

Dynamische Modellbildung als Element von verfügbarkeits- und prozeßorientierten Untersuchungen komplexer kraftwerkstechnischer Systeme

Von der Fakultät für Maschinenbau, Elektrotechnik und
Wirtschaftsingenieurwesen der Brandenburgischen Technischen
Universität Cottbus zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Diplom-Ingenieur

Matthias Klatt

geboren am: 26. 01. 1957 in Merseburg

Vorsitzender: Professor Dr. rer. pol. W. Fichtner

Gutachter: Professor Dr.-Ing. H. J. Krautz

Gutachter: Professor Dr.-Ing. G. Lappus

Tag der mündlichen Prüfung: 20. Dezember 2007

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Kraftwerkstechnik der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus.

Für die Betreuung meiner Arbeit möchte ich mich besonders bei dem Inhaber des Lehrstuhls Kraftwerkstechnik, Herrn Prof. Dr.-Ing. H. J. Krautz, bedanken. Er gewährte an seinem Lehrstuhl den notwendigen Rahmen für eine solche wissenschaftliche Tätigkeit und unterstützte mich bei der Anfertigung der Arbeit durch wertvolle Anregungen.

Gleichfalls bedanken möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. G. Lappus als Gutachter, zumal auf die Kontakte mit Ihm und seine Anregungen der Ursprung dieser Arbeit zurückgeht.

Auch danke ich Herrn Dr. rer. pol. W. Fichtner für die Übernahme des Vorsitzes des Promotionsausschusses.

Allen Kollegen, Lehrstuhlangehörigen sowie studentischen Hilfskräften möchte ich dafür danken, daß sie zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Fast alle Hardware- und Softwarebezeichnungen, die in dieser Arbeit erwähnt werden, sind gleichzeitig auch eingetragene Warenzeichen oder sollten als solche betrachtet werden. Warennamen werden ohne Gewährleistung der freien Verwendbarkeit benutzt.

Cottbus, im Oktober 2007

Matthias Klatt

Inhalt

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangssituation	1
1.2	Zielsetzung	1
1.3	Methodische Überlegungen zu einem Gesamtmodell	3
2	Übersicht zur Modellierung und Simulation.....	5
2.1	Stand der Anwendung von Simulationswerkzeugen.....	5
2.1.1	Prozeßmodellierung – Softwarewerkzeuge.....	5
2.1.2	Verfügbarkeitsmodellierung – Softwarewerkzeuge.....	7
2.2	Stand der Modellierung von energietechnischen Anlagen	8
2.2.1	Stand der Prozeßmodellierung	8
2.2.2	Stand der Verfügbarkeitsmodellierung	12
3	Lösungsvorschlag für ein Gesamtmodell.....	17
3.1	Methoden der Verfügbarkeitsmodellierung.....	17
3.2	Methoden der Prozeßmodellierung.....	18
3.3	Geeignete Modellierungsmethode	18
3.4	Physikalisch - Technische Grundlagen.....	20
3.4.1	Rechenverfahren „stromabwärts“ und „stromaufwärts“	20
3.4.2	Datenstrukturen für Prozeßmodellierung in Simulink	22
4	Modellentwicklung und Anwendung auf eine Komponentenbibliothek	27
4.1	Basismodelle physikalisch - technischer Komponenten.....	27
4.1.1	Sprungantwortmodell	27
4.1.2	Fluidspeicherung in Volumenelementen.....	28
4.1.3	Fluidreibung und -beschleunigung in Strömungspfaden	29
4.1.4	Wärmeübergang und -speicherung in festen Wänden.....	30

4.2	Komponentenbibliothek - Realisierung und Beschreibung	32
4.3	Leitungen.....	34
4.3.1	Rohrleitung	34
4.3.2	Drossel	36
4.3.3	Verzweigung.....	38
4.3.4	Zusammenführung	41
4.4	Wärmetauscher.....	43
4.4.1	Luft- / Wasservorwärmer.....	43
4.4.2	Kondensator	46
4.4.3	Entgaser	50
4.4.4	Kühlturm.....	52
4.5	Turbomaschinen	55
4.5.1	Vollbeaufschlagte Stufengruppe mit Wirkungsgradkennlinie	55
4.5.2	Vollbeaufschlagte Stufengruppe mit Anzapfung	57
4.5.3	Einfache Pumpe	60
4.5.4	Pumpe mit Anzapfung	63
4.5.5	Lüfter und Saugzug.....	67
4.6	Dampferzeuger.....	70
4.6.1	Ein-Phasen-Heizfläche	70
4.6.2	Verdampfer	74
4.6.3	Wasserabscheider	78
4.6.4	Einspritzung	81
4.6.5	Brenner / Brennkammer	83
4.7	Randbedingungen.....	85
4.7.1	Randbedingungen Zuströmung.....	85
4.7.2	Randbedingungen Abströmung	87

4.7.3	Wärmesenke	88
4.8	Stoffwerte und Hilfsgrößen.....	88
4.8.1	Thermo-Physikalische Stoffwerte	88
4.8.2	Wasser und Wasserdampf	90
4.8.3	Luft und Rauchgas.....	91
4.8.4	Feste Einsatzstoffe und Konstruktionsmaterialien.....	92
5	Anwendung und Validierung der Komponentenbibliothek.....	93
5.1	Lastwechselverhalten einer niedrigexpandierten Druckwirbelschicht ...	93
5.1.1	Beschreibung der Schaltung	93
5.1.2	Parametrierung, Simulation, Ergebnisse	95
5.2	Simulationsergebnisse einer komplexen Kraftwerksschaltung	105
5.2.1	Beschreibung der Schaltung	105
5.2.2	Parametrierung, Simulation, Ergebnisse	113
6	Schlußfolgerungen und Ausblick.....	119
7	Literatur	123
8	Anhang	127

Symbole und Bezeichnungen

a	Formfaktor, Koeffizient	Nu	Nusseltzahl
A	Fläche	p	Druck
a, b, c	Koeffizienten	p_i	Nullstellen einer char. Gleichung
c	Geschwindigkeit	Pr	Prandtlzahl
C_f	Fluidspeicherkapazität	\dot{q}	Wärmestromdichte
c_p	spezifische isobare Wärmekapazität	\dot{Q}	Wärmestrom
C_w	Wandelastizität	R	Reibungsterm, Gaskonstante
d	Durchmesser	Re	Reynoldszahl
$\frac{d}{dt}$	Ableitung nach der Zeit	t	Temperatur, Zeit
F(p)	Übertragungsfunktion	T	Absoluttemperatur, Zeitkonstante
f_{id}	Medienkennzahl	u	Eingangsvektor eines dynamischen Systems
h	spezifische Enthalpie	V	Volumen
H	absolute Enthalpie	\dot{V}	Volumenstrom
\dot{H}	absoluter Enthalpiestrom	x	Dampfgehalt
I	translatorischer Trägheitsterm	x_d	Regelabweichung
J	Trägheitsmoment	y	Ausgangsvektor eines dynamischen Systems
k	Wärmedurchgangskoeffizient	y	Stellgröße
l, L	Länge	y_0	Startwertbedingung
\dot{m}	Massenstrom	y_h	homogene Lösung
M	Drehmoment		
n	Exponent, Drehzahl		

y_{ss}	stationäre Lösung (= "steady state")
z	Kompressibilitätsfaktor
α	Wärmeübergangskoeffizient
β	Elastizitätskoeffizient
η	Wirkungsgrad
κ	Polytropenexponent
Δp	Druckdifferenz / -verlust
Δt	Temperaturdifferenz, Zeitschritt
Δz	Streckenabschnitt
ζ	Druckverlustbeiwert
ϑ	Temperatur
λ	Wärmeleitfähigkeit
ξ	Reibungsbeiwert
ρ	Dichte

Indizes / Exponenten / Abkürzungen

A	Austritt	KW	Kühlwasser
Abd	Abdampf	m	mittlere
E	Eintritt	s	Siedezustand
i	innere (r)	w	Wand
i	Laufindex	0	nominal
is	isentrop	'	siedende Flüssigkeit
korrr	korrigiert	"	gesättigter Dampf
kr	kritisch		

Abbildungsverzeichnis ^(*)

Abbildung 1: Reihenschaltung	13
Abbildung 2: Parallelschaltung	14
Abbildung 3: Blockdiagramm.....	14
Abbildung 4: Fehlerbaum	15
Abbildung 5: Einfacher Kraftwerksprozeß	20
Abbildung 6: Bilanz am Volumenelement.....	28
Abbildung 7: Bilanz am Strömungspfad.....	29
Abbildung 8: Bilanz am Wandelement	30
Abbildung 9: Aufteilung der Berechnungs- bzw. Interpolationsbereiche	90
Abbildung 10: Beispiel für ein angepaßtes Dreiecksgitter	90
Abbildung 11: Vergleich Rechenaufwand	91
Abbildung 12: Kompressibilitätsfaktor feuchter Luft.....	92
Abbildung 13: Spez. isobare Wärmekapazität feuchter Luft.....	92
Abbildung 14: GuD-Anlage mit Druckwirbelschichtfeuerung	93
Abbildung 15: P200-Module.....	94
Abbildung 16: Modellstruktur Wasser-/Dampf-Kreislauf.....	97
Abbildung 17: Modellstruktur Gasturbinenanlage	97
Abbildung 18: Speisewassermenge und Frischdampfmenge	98
Abbildung 19: Wirbelschichthöhe	99
Abbildung 20: Frisch- und Zwischendampftemperaturen	100
Abbildung 21: Hochdruckdampfturbine	101
Abbildung 22: Gasturbinenleistung und Ölmenge Freiraumfeuerung	102

^(*) Ab Abbildung 29 im Anhang.

Abbildung 23: Temperaturen Wirbelschicht- und Gasturbinenaustritt.....	103
Abbildung 24: Kompressoraustrittsdruck.....	104
Abbildung 25: Anlagenübersicht des Kraftwerkes	105
Abbildung 26: Modellstruktur Wasser - / Dampf - Kreislauf.....	107
Abbildung 27: Drehzahl der beiden Frischlüfter (Drz Frischlüfter) und Differenzdrücke (PD FriLü)	116
Abbildung 28: Durchsatz der beiden Frischlüfter (F FriLü).....	117
Abbildung 29: Das Kraftwerk – Übersichtsbild.....	128
Abbildung 30: Das Kraftwerk – detaillierte Darstellung	129
Abbildung 31: Elektro-Schiene	130
Abbildung 32: 27 kV und 10 kV-Schienen.....	131
Abbildung 33: 10 kV – und 690 V - Schienen.....	132
Abbildung 34: 10 kV - und 400 V - Schienen	133
Abbildung 35: Zentrale Ver- und Entsorgung	134
Abbildung 36: Wasseraufbereitung.....	135
Abbildung 37: Kohlevorbereitung	136
Abbildung 38: Kalksteinaufbereitung	137
Abbildung 39: Kalksteinsuspensionspumpen	138
Abbildung 40: Nassaschesammlung	139
Abbildung 41: Filteraschesammlung	139
Abbildung 42: Filterasche- (Trockenasche-) verladung	140
Abbildung 43: Gipsaufbereitung	141
Abbildung 44: Prozessdampf-Schiene	142
Abbildung 45: Fernwärme-Schiene	143
Abbildung 46: Block A	144
Abbildung 47: Bekohlung	145

Abbildung 48: Bunker 4 mit Austragsystem.....	146
Abbildung 49: Dampferzeuger.....	147
Abbildung 50: Wasser-Dampf-Seite	148
Abbildung 51: Verdampfer-System	149
Abbildung 52: Wasser-Abscheider	150
Abbildung 53: Überhitzer-System	151
Abbildung 54: Zwischenüberhitzer.....	152
Abbildung 55: Luftvorwärmungs- und Rauchgassystem	153
Abbildung 56: Elektro-Filter.....	154
Abbildung 57: Turbinen	155
Abbildung 58: Hochdruck-Turbine.....	156
Abbildung 59: Schnellschlussventil der Hochdruck-Turbine.....	156
Abbildung 60: Mitteldruck-Turbine.....	157
Abbildung 61: Niederdruck-Turbinen.....	158
Abbildung 62: Kühlwasserkreislauf.....	159
Abbildung 63: Speisewassersystem	160
Abbildung 64: Kondensatoren	161
Abbildung 65: Kondensatpumpen und -reinigungssystem	162
Abbildung 66: Niederdruckvorwärmung	163
Abbildung 67: NDVW A3	164
Abbildung 68: RGWT-Umfahrung	165
Abbildung 69: SPAT	166
Abbildung 70: Hochdruckvorwärmung	167

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

In den letzten Jahrzehnten sind die Einsatzanforderungen speziell an Dampfzeuger, aber auch an komplette Kraftwerksanlagen, ständig gestiegen. Neue Bedingungen ergeben sich dabei vor allem in jüngster Zeit durch die Rückwirkungen einer Liberalisierung des Strommarktes auf den Betrieb des Kraftwerksparkes der beteiligten Energieversorgungsunternehmen. Anlagen werden zunehmend aus dem Grundlastbetrieb in den Mittellastbetrieb verdrängt, bis hin zum Aussetzerbetrieb an den Wochenenden und Nachts. Ein weiterer Aspekt sind die Wechselwirkungen zwischen Übertragungsnetzen und einspeisenden Erzeugern einerseits sowie Verbrauchern andererseits bei einem tendenziell zunehmenden Anteil von Gleichstromerzeugern mit anschließender Wandlung in Drehstrom (Windkraft, Photovoltaik und Brennstoffzellen).

Dabei ergeben sich zum Teil widersprüchliche Anforderungen an die Anlagen, insbesondere auch bezüglich der Weiterentwicklung von Leit- und Regeltechnik. Dies hat insgesamt Auswirkungen bis hin zu den Anforderungen an das einzusetzende Personal unter den sich ändernden externen Erzeugungsbedingungen und Anpassungsprozessen bezüglich Management-, Personal- und Informationsstrukturen.

1.2 Zielsetzung

Vorgesehen ist eine Modellierung der Kurzzeitdynamik energietechnischer Anlagen. Daß heißt, das mit den erstellten Modellen der zeitliche Verlauf typischer Prozeßparameter der genannten Anlagen im Sekunden-, Minuten- und Stundenbereich simuliert werden kann. Die Simulation sehr langsamer Parameteränderungen sowie stationärer Lastpunkte stellt hier nur einen Grenzfall dar - generell nicht vorgesehen ist die Modellierung mehrdimensionaler Feldprobleme an Einzelkomponenten wie Spannungsverteilung in dickwandigen Bauteilen oder Geschwindigkeitsverteilungen in durchströmten Behältern.

Der zu modellierende Umfang von Anlagen soll dabei von klassischen atmosphärischen, vorzugsweise braunkohlestaubgefeuerten, Kraftwerken bis zu

kombinierten Gas-/Dampfanlagen mit integrierter Wirbelschichtfeuerung reichen.

Als praktisches Ergebnis der vorliegenden Arbeit soll eine Komponentenbibliothek für typische energietechnische Anlagen entwickelt werden, welche die Ausführung entsprechender Simulationen innerhalb einer geeigneten Standardsoftware erlaubt.

Der zu modellierende Umfang der Anlagenkomponenten hat sowohl Standardkomponenten (Rohrleitungen, Behälter, Verzweigungen, ...), klassische maschinentechnische (Pumpen, Turbinen, ...) und wärmetechnische Komponenten (Wärmetauscher, ...), als auch spezifische Komponenten, wie z.B. einen Wirbelschichtmodul zu beinhalten.

Die Überprüfung der Modellierungsgüte hat anhand realer Prozeßdaten ausgeführter Kraftwerksanlagen zu erfolgen. Dabei ist qualitativ und quantitativ insbesondere auch zu bewerten, inwieweit die tatsächliche Anlagenkonfiguration im Rahmen der untersuchten Modelle realistisch abgebildet werden kann und welchen Einfluß die notwendigerweise getroffenen Vereinfachungen und Abstrahierungen auf die Simulationsergebnisse haben.

Letztendlich soll es das zu entwickelnde Modell ermöglichen, Vorabsimulationen von Schaltungsvariationen sowohl im Planungsstadium zukünftiger Anlagen als auch im Rahmen von Retrofitstudien zu ermöglichen; für instationäre Betriebsfälle ausgeführter Anlagen nichtmeßbare Prozeßparameter nachzurechnen; Anlagenstörungen zu analysieren bzw. mögliche Störungsszenarien vorab zu untersuchen. Für Anlagenbetreiber soll es möglich sein, Modelle seiner Anlagen betriebsbegleitend einzusetzen und Fragestellungen bezüglich der Optimierung der Fahrweise seiner Anlagen zu untersuchen.

Generell soll es die Modellierungsmethodik auch erlauben, die zu entwickelnde Komponentenbibliothek in übergeordnete Simulationsumgebungen zu integrieren, so z.B. unter Einbeziehung der Modellierung des Verfügbarkeitsverhaltens kraftwerkstechnischer Anlagen.

1.3 Methodische Überlegungen zu einem Gesamtmodell

Da explizit die Zielstellung besteht, für die Modellierung und Simulation von Kraftwerksanlagen auf verfügbare Standardsoftware aufzusetzen, diese an die Besonderheiten der Prozeßmodellierung anzupassen und um eine geeignete Komponentenbibliothek zu erweitern, ist das in Frage kommende Softwarepaket anhand mehrerer Kriterien zu überprüfen und auszuwählen.

Als erstes sollte es ein Softwarepaket sein, welches bereits eine breite Einführung sowohl in Forschung und Lehre als auch in der Industrie erfahren hat. Dann kann davon ausgegangen werden, daß eine langfristige Softwarepflege und ein professioneller Support gewährleistet sind sowie auch innerhalb der Nutzergemeinschaft ein breiter Erfahrungsaustausch stattfindet (Publikationen, Anwendertreffen, Newsgroups).

Als zweites hat das Softwarepaket eine graphische Oberfläche aufzuweisen, damit nur eine geringe Einarbeitung in die Handhabung der erstellten Modellkonfigurationen und der auszuführenden Simulationen notwendig ist und damit die Nutzung der Komponentenbibliothek einem größeren Nutzerkreis offen steht.

Des weiteren ist ein Softwarepaket auszuwählen, welches multiplattformfähig ist, also die Entwickler und Anwender nicht auf ein Betriebssystem und eine Hardware-Familie festlegt. Auch sollte das Softwarepaket zumindestens prinzipiell in Mehrprozessor- und Echtzeitumgebungen integrierbar sein.

Als abschließendes Kriterium, welches wesentlich hinsichtlich der Anpassung an die Spezifika der Prozeßmodellierung ist, steht die Forderung nach einer offenen Entwicklungsumgebung mit den entsprechenden Software- und Programmierschnittstellen. Auch sollte das Softwarepaket für die Umsetzung fachübergreifender Modellierungsaufgaben geeignet sein. Es kann zwar z.B. schwerpunktmäßig auf die Modellierung und Simulation von regelungstechnischen Problemstellungen ausgerichtet, sollte aber nicht auf ein spezielles Einsatzgebiet, wie z.B. Schaltkreissimulation, festgelegt sein.

2 Übersicht zur Modellierung und Simulation

2.1 Stand der Anwendung von Simulationswerkzeugen

2.1.1 Prozeßmodellierung – Softwarewerkzeuge

Für die allgemeine Prozeßmodellierung und speziell für kraftwerkstechnische Prozeßuntersuchungen gibt es eine Reihe bekannter Softwarewerkzeuge. Einige dieser Programme sowie deren Anbieter und die wichtigsten Eigenschaften sind in folgender Übersicht aufgezählt:

Programm/ Anbieter	wichtigste Eigenschaften
KPRO/Fichtner:	Für statische Modellierungsaufgaben; Erweiterungen über „Kennfeldkomponenten“ möglich
Ebsilon/Sofbid:	Für statische Modellierungsaufgaben; Programmierschnittstelle vorhanden
ProSIM/TU Helsinki:	Für statische Modellierungsaufgaben; Programmierschnittstelle vorhanden; setzt AutoCAD voraus.
Aspen Dynamics TM :	Für dynamische Modellierungsaufgaben; Untersuchungen an verfahrenstechnischen Anlagen der Chemieindustrie; sehr umfangreiche Stoffdatenbank; Programmierschnittstelle vorhanden.
XMAT/Siemens:	Für durchgängiges Projektieren und Simulieren von technologischen Prozessen, z.B. auch dynamische Modelle für Schulungssimulatoren oder Echtzeitsysteme.
Smile/TU Berlin:	Universitäre Entwicklungsumgebung zur gleichungsorientierten dynamischen Modellierung; ohne graphische Oberfläche (separates Postprocessing).
Simulink/Matlab:	Offene Entwicklungsumgebung zur blockorientierten dynamischen Modellierung.
Sonata/ABB Carbon:	Proprietäre Modellierungsumgebung zur dynamischen Simulation von Kombi-Kraftwerken mit stationärer Druckwirbelschichtfeuerung; keine Programmierschnittstelle und kein GUI (separates Pre- und Postprocessing).

Wie zu sehen ist, sind die Programme teilweise in ihrer Anwendbarkeit auf stationäre Berechnungen spezialisiert, teilweise ist auch ihre Erweiterbarkeit um neue Komponenten eingeschränkt oder aber nicht vorhanden.

Die einzusetzende Basissoftware sollte sowohl für Windows-PCs als auch für Unix-Workstations vorliegen, um zum einen Modellaufbereitung und Ergebnisauswertung mit üblicher Arbeitsplatztechnik durchführen zu können und zum anderen für Detail- und Variantenuntersuchungen ausreichend Rechenleistung zur Verfügung zu haben.

Das einzusetzende Softwarewerkzeug muß außer der o.g. noch weiteren Anforderungen genügen:

- graphische Oberfläche;
- modulare Ausbaufähigkeit von Komponentenbibliotheken durch Implementierung eigener Algorithmen;
- mathematisch-numerische „Lösungsmaschine“ für stationäre Modellansätze;
- Grundbausteine müssen sowohl verfahrenstechnische Modellierung als auch die Anwendung von Übertragungsfunktionen / Entscheidungsmatrizen für die Behandlung von Informationsflüssen erlauben.

Die in der Übersicht genannten Programmierschnittstellen erlauben die Erstellung eigener Anlagenkomponenten zur Erweiterung der Prozeßmodellierung. Dabei sind diese Schnittstellen entweder kennfeldorientiert oder gleichungsorientiert.

Eine Ausnahmestellung nimmt bei den für die Prozeßmodellierung geeigneten Softwarewerkzeugen das Paket „Simulink/Matlab“ der Fa. Mathworks ein:

- Es ist generell auf die Untersuchung dynamischer Systeme ausgerichtet.
- Es können beliebige Berechnungsalgorithmen sowohl in einer eigenen Skriptsprache, als auch in C bzw. Fortran nutzbar gemacht werden.
- Die graphische Bedienoberfläche beinhaltet auch die dynamische Ergebnisvisualisierung.

- In Zusammenhang mit dem Paket Stateflow ist auch die Modellierung von diskreten Zustandsverknüpfungen und sog. Markov-Ketten möglich (s.a. „Methoden der Verfügbarkeitsmodellierung“).
- Für spezielle Aufgabenklassen kann auf eine Vielzahl von Bibliotheken bzw. Toolboxes aufgebaut werden (Regelungs- und Steuerungstechnik; Datenbankanbindung; Signalverarbeitung; Excel-Link; Fuzzy Logic; Systemidentifikation; künstliche Neuronale Netze; Meßdatenerfassung; Echtzeitsimulation u.a.).

2.1.2 Verfügbarkeitsmodellierung – Softwarewerkzeuge

Die Methoden zur Verfügbarkeitsmodellierung sind in verschiedenen Programmen zur Modellierung von Verfügbarkeiten umgesetzt und werden teilweise auch industriell in der Anlagenplanung eingesetzt.

Eine durchgeführte Recherche zu Softwarewerkzeugen ergab insgesamt eine deutlich größere Anzahl von Programmen, es können an dieser Stelle aber nur einige Beispiele aufgezählt werden:

AvSim+ (Itemsoft)	Blockdiagramm und Fehlerbaum unter einer graphischen Oberfläche, div. Datenbankschnittstellen
FaultTree (Itemsoft)	Fehlerbaum unter graphischer Oberfläche mit diversen Datenbankschnittstellen
RAMP (Thompson & Partners)	Minimierung von Stillstandszeiten, Optimierung von Wartungsintervallen, inkl. Redundanzen
Matlab/StateFlow (MathWorks)	Offene Entwicklungsumgebung zur Abbildung von Zustandsverknüpfungen

Die drei erstgenannten Programme sind in ihrem Funktionsumfang auf die reine Verfügbarkeitsmodellierung beschränkt, wohingegen das letztgenannte Programm, wie schon in 2.1.1 ausgeführt, ein allgemeines Modellierungs- und Simulationsprogramm darstellt.

Weiterhin wurden bei der Recherche viele Hilfsprogramme aus dem Bereich der Statistik gefunden, deren Algorithmen teilweise auch im Quellcode vorliegen. Ein weiteres Ergebnis sind Hinweise und Bezugsquellen für Datenbanken mit statistischen Daten über die Ausfallwahrscheinlichkeiten von verschiedensten Bauteilen und Apparaten.

2.2 Stand der Modellierung von energietechnischen Anlagen

2.2.1 Stand der Prozeßmodellierung

Prozeßmodelle dienen dazu, die Zustandsänderungen einer Anlage bei Änderungen der Konfiguration bzw. der Randbedingungen dieser Anlage zu bestimmen. Dabei ist unter "Anlage" ein beliebiges verfahrenstechnisches Objekt mit stofflichen und energetischen Zuständen in dessen Komponenten sowie stofflichen und / oder energetischen Flüssen zwischen diesen Komponenten zu verstehen. Die zu modellierende "Anlage" ist daher ein Kraftwerksblock mit den entsprechenden kraftwerkstypischen Komponenten. Die zu betrachtenden Zustände in den Komponenten sind dann Temperatur, Druck, Dichte, Enthalpie, Entropie, Konzentration und die eingespeicherte Masse / Energie. Diese Zustände ändern sich durch Flüsse zwischen den Komponenten: Massen-, Energie- und Wärme- fluß.

"Änderung der Konfiguration" umfaßt die Veränderung der Eigenschaften einer vorhandenen Komponente (Verschmutzung oder Verschleiß), den Ersatz einer Komponente und auch die Veränderung ihrer anlagentechnischen Verschaltung (Ertüchtigung einer Anlage). "Änderungen der Randbedingungen" ergeben sich aus Eingriffen in die Fahrweise der Anlage (Zu- oder Abschalten von Komponenten oder ganzen Anlagensträngen, Veränderung von Ventilstellungen, Drehzahlen o.ä.), aus der Überführung der Anlage aus einem Sollzustand in einen anderen (Laständerung der Gesamtanlage oder Sollwertänderung für einzelne Regelkreise) oder bei der Untersuchung von speziellen Störfällen mit dem plötzlichen Ausfall von Komponenten (Verlust des Fördervermögens, Leckagen, Überströmungen).

Im Folgenden werden die Methoden, die zur Prozeßmodellierung angewendet werden können, kurz im Einzelnen beschrieben:

Klassische Übertragungsfunktionen

Sie werden vorwiegend in der Regelungstechnik angewendet und dienen dazu, klassische Regelkonzepte zu erweitern. Dadurch können aber nur lineare Regelkonzepte berücksichtigt werden. Außerdem ist es möglich, die einzelnen Quereinflüsse bei Mehrgrößenreglern zu entkoppeln.

Parametrisierte Antwortmodelle

Sie basieren auf der Theorie linearer dynamischer Systeme und kommen in der Regel mit relativ wenig Kenngrößen aus (z.B. Parameter von Sprungantworten). Daher müssen sie aufgrund experimenteller Daten bzw. Betriebsdaten parametrisiert werden. Auch stationäre Endzustände von Übergangsvorgängen müssen in der Parametrierung berücksichtigt werden. Bei nichtlinearen Systemen können diese durch zustandsabhängige Parametrierung angepaßt werden, wobei dieser Anpassung aber vom Modell und von der Parameteridentifikation her Grenzen gesetzt sind.

Gewöhnliche Differentialgleichungen mit konzentrierten Ortskoordinaten

Diese erlauben die Modellierung der nichtlinearen Dynamik. Dabei vernachlässigen sie die örtliche Ausdehnung der zu modellierenden Komponenten und bilden diese über so genannte konzentrierte Größen, wie Volumen oder Höhendifferenz, ab ("lumped parameters").

Gewöhnliche Differentialgleichungen mit abschnittsweise verteilten Ortskoordinaten

Sie stellen eine direkte Erweiterung der gewöhnlichen Differentialgleichungen mit konzentrierten Ortskoordinaten dar. Die zu modellierenden Komponenten werden in ausreichend kleine (kurze) Abschnitte unterteilt, und jeder Abschnitt wird separat durch gewöhnliche Differentialgleichungen mit konzentrierten Ortskoordinaten beschrieben. Die Kopplung erfolgt über die Randbedingungen

der einzelnen Abschnitte. Diese Methode erfordert jedoch relativ viele technische Daten der konstruktiven Ausführung der Komponenten.

Partielle Differentialgleichungen

Sie stellen die aufwendigste Methode bezüglich der notwendigen technisch-physikalischen Daten und des numerischen Aufwandes dar. Dabei werden die vollständigen partiellen Differentialgleichungen der Wärmeleitung und des gekoppelten Wärme- und Stofftransportes in strömenden Medien angewendet. Es ist typisch, diese Methode für die numerische Strömungsmechanik oder für Festigkeitsuntersuchungen mit Finiten Elementen anzuwenden. Allerdings liegt die Grenze dieser Methode neben dem Aufwand in den zur Verfügung stehenden physikalischen Modellen.

Die beiden Extreme im Spektrum numerischer Kraftwerkssimulationen werden durch Stamatelopoulos [34] und Döring [4] charakterisiert. Ersterer beschränkt sich auf die Modellierung stationärer Systeme, allerdings unter Optimierungsaspekten. Letzterer unternimmt den Versuch, konventionelle dynamische Modellierung von Kraftwerkskomponenten (abschnittsweise konzentrierte Parameter) mit komplexen Strömungsvorgängen zu verknüpfen (partielle Differentialgleichungen freier Konvektionsströmungen).

Typisch für den Stand von Forschung und Entwicklung ist die Arbeit von Rose [26]. Hier wird versucht, die Modellgleichungen neu aus der bilanzierenden Integration über Kontrollvolumina analog zur Methode der Finiten Volumina für Partielle Differentialgleichungen herzuleiten. Außerdem erfolgt hier eine Kopplung von Modellen des Komponentenverhaltens mit Modellen der digitalen Regelsysteme, um erweiterte Klassen von dynamischen Vorgängen simulieren zu können.

Insgesamt gibt es im Bereich der Dampferzeugersimulation eine Vielzahl von Arbeiten. Die Bandbreite dieser Arbeiten geht von Modellen für einzelne Dampferzeugerkomponenten über lineare Modelle bis zu den nichtlinearen Modellen für komplette Dampferzeuger.

In einer frühen Arbeit unter der Leitung von Profos löst Shang in Zürich das Gleichungssystem, das bei der Linearisierung des Differentialgleichungssystems entsteht. Mit diesem linearisierten Modell werden verschiedene Störungen, Speisewassermassenstrom und Feuerung, für Zwangdurchlaufdamperzeuger berechnet. Die Übertragbarkeit auf andere Damperzeuger ist aber mit großem Aufwand verbunden [33].

Eine Reihe von dynamischen Damperzeugersimulationen wurden unter der Leitung von Dolezal erst an der Universität Stuttgart [16] und später an der Technischen Universität Braunschweig [15] durchgeführt. Weitergeführt werden diese Arbeiten auch von Hönig [10]. Die einzelnen Wärmetauscherflächen werden nicht geschlossen mit der Rauchgas- und Wasser-Dampf-Seite berechnet, sondern über die Rohrwände der Heizflächen aufgetrennt und semianalytisch modelliert. Der einzelne Wärmetauscher wird nicht als Rekuperator betrachtet, sondern als Regenerator mit einer sehr kurzen Umschaltzeit. In nachfolgenden Arbeiten wurde für die Wand eine Ersatzfunktion eingeführt [27]. Mit diesem Modell und der regenerativen Berechnungsweise wird das Verhalten von Naturumlauf- und Zwangdurchlaufdamperzeugers bei Störfällen betrachtet sowie Strömungspulsationen in einem Zwangdurchlaufdamperzeuger und ein Zwangdurchlaufdamperzeuger mit einer vorgeschalteten Gasturbine.

In Aachen wurde unter der Leitung von Dibelius mit einem expliziten Differenzenverfahren das partielle Differentialgleichungssystem, das durch die Aufstellung der drei Erhaltungsgleichungen entsteht, nach einer Ortsdiskretisierung gelöst [39]. Mit diesem Modell wurden Störfälle in einem Hochtemperaturreaktor berechnet. Auch wurde ein Modell zur Berechnung des dynamischen Teillastverhaltens konventioneller Kraftwerksblöcke entwickelt, wobei das partielle Differentialgleichungssystem, das nach der Ortsdiskretisierung entsteht, mit einem numerischen Lösungsverfahren nach Gear für steife Differentialgleichungen gelöst wird [8]. Mit diesem Modell und zwei vereinfachten Modellen, in denen die Erhaltungsgleichungen für den Impuls und die Masse stationär betrachtet werden, wurde das dynamische Verhalten eines Wirbelschichtdamperzeugers eines Heizkraftwerkes simuliert, und die Ergebnisse der vereinfachten Modelle mit denen des vollständig instationären Modells verglichen [32]. Mit

einem modifizierten Gear-Verfahren wurden die Modelle dann weiterentwickelt und sowohl dynamische Dampferzeugerprozesse, als auch Störfälle berechnet [5].

Franke u.a. in Darmstadt entwickelten ein im Lösungsverfahren modifiziertes Modell, hier werden die nach der örtlichen Diskretisierung gewöhnlichen Differentialgleichungen durch ein modifiziertes Runge-Kutta-Verfahren gelöst. Um zwischen Genauigkeit und benötigter Rechenzeit zu optimieren, wird mit einer vorgegebenen Fehlerschranke die Zeitschrittweite automatisch gesteuert. In einer ersten Version wurden für einen Benson-Dampferzeuger Veränderungen der Speisewassermenge sowie die Aufhebung der Turbinenventilandrösselung berechnet [6]. Danach wird das Modell zur Untersuchung von Strömungssoszillationen auf der Wasser-Dampf Seite herangezogen [7].

Für alle der hier vorgestellten Dampferzeugermodelle gilt, daß die dahinterstehenden Rechenprogramme i.A. nicht frei verfügbar sind, und damit diese Modelle nicht ohne vollständige Neuprogrammierung zu nutzen sind.

2.2.2 Stand der Verfügbarkeitsmodellierung

Im speziellen Bereich der Kraftwerke beschränkt sich die Forschung hauptsächlich auf Zuverlässigkeit und Ausfallsicherheit in Kernkraftwerken, da dort verstärkt Wert auf die Sicherheit und Zuverlässigkeit von Systemen gelegt werden muß. Als "Nebenprodukt" fallen dort natürlich auch Daten über Baugruppen und Anlagenteile an, die sich in konventionellen Kraftwerken wiederfinden (Turbinen, Pumpen, Wärmetauscher, Rohrleitungen usw.). Diese Daten werden teilweise veröffentlicht [24] bzw. von verschiedenen Anbietern in Form von statistischen Datenbanken zum Kauf angeboten.

Zuverlässigkeitskenngrößen von Systemen

Um von der Zuverlässigkeit der Einzelkomponenten auf die Zeit- und Arbeitsverfügbarkeit des Gesamtsystems zu schließen, müssen mehrere Faktoren berücksichtigt werden. Dies sind sowohl etwaige Redundanzen im System als auch Ausfälle oder Minderleistungen durch Störungen und Schäden sowie deren Behebung.

Allgemein gibt es mehrere Methoden, mit denen die Zuverlässigkeit von Systemen analysiert werden kann und die Berechnung verschiedener Zuverlässigkeitskenngrößen erlauben. Sie unterscheiden sich in ihrem Aufbau, dem nötigen Aufwand und der Art und Qualität ihres Ergebnisses voneinander. Nachfolgend sind einige bekannte und verbreitete Methoden beschrieben und ihre wichtigsten Eigenschaften aufgelistet.

Blockdiagramm

In der deutschen Literatur wird es auch als "zuverlässigkeitslogisches Schemal", im Englischen als "Reliability Block Diagram (RBD)" oder "Success Diagram (SDM)" bezeichnet. Das Blockdiagramm ist ein Modell des Systems, bei dem die Einzelkomponenten (oder auch ganze Subsysteme) durch Blöcke, und die zuverlässigkeitslogischen Verknüpfungen durch Verbindungen der Blöcke untereinander repräsentiert werden. Blöcke, deren Fehlfunktion zu einer Fehlfunktion des Systems führen, werden in Reihe angeordnet, es wird eine Reihenschaltung erhalten (Abbildung 1). Sie stellt die einfachste und am häufigsten vorkommende Anordnung von Komponenten in technischen Anlagen dar.



Abbildung 1: Reihenschaltung

Blöcke, deren Fehlfunktion nur in Verbindung mit einer Fehlfunktion anderer Blöcke zu einer Fehlfunktion des Systems führen, werden parallel zu diesen angeordnet, es wird eine Parallelschaltung erhalten (Abbildung 2).

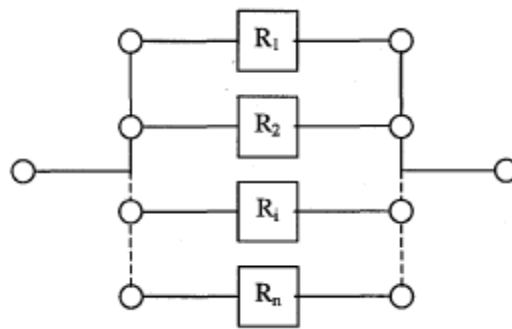


Abbildung 2: Parallelschaltung

Durch Kombination der beiden Schaltungsarten ist es nun möglich, die Zuverlässigkeit komplexer Systeme mit einfachen mathematischen Ausdrücken zu beschreiben und zu berechnen. Als Beispiel ist in Abbildung 9 ein einfaches Blockdiagramm für vier Komponenten zu sehen.

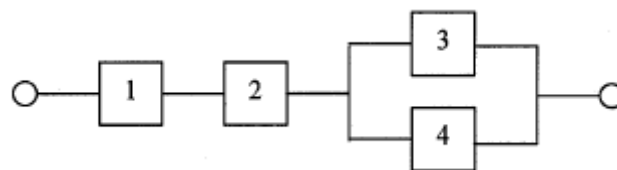


Abbildung 3: Blockdiagramm

Es sind im Schaubild ersatzweise nur die Nummern der Komponenten eingetragen, die Komponentenzuverlässigkeit repräsentieren. Mithilfe eines Blockdiagramms kann die Zeitverfügbarkeit eines nicht-reparierbaren Systems berechnet werden bei dem die Komponentenausfälle unabhängig voneinander sind [2].

Fehlerbaum

Die Fehlerbaumanalyse (englisch "Fault Tree Analysis (FTA)") ist eine deduktive Methode, bei der ausgehend von einem unerwünschten Ereignis (Ausfall des Gesamtsystems) nach allen Ursachen gesucht wird, die zu diesem führen können. Die gefundenen Ursachen und ihre logischen Verknüpfungen werden in einem Fehlerbaum dargestellt. Dieser hat als Beispiel folgendes Aussehen:

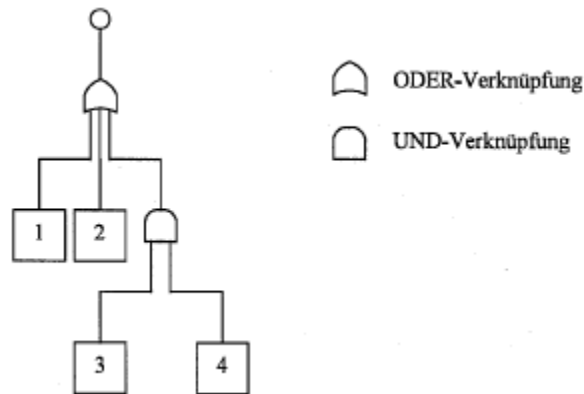


Abbildung 4: Fehlerbaum

Hierbei können die mit 1 bis 4 bezeichneten Ereignisse z.B. Ausfälle von Subsystemen oder aber auch Komponenten sein. Werden zusätzlich Wahrscheinlichkeiten für solche Ausfälle verwendet, ist es möglich, die Systemzuverlässigkeit zu bestimmen. Die Berechnung kann dann unter der Annahme, daß die Ausfälle der Einzelkomponenten unabhängig voneinander sind und es sich um ein nicht-reparierbares System handelt, wie beim RBD mit Hilfe der Booleschen Algebra erfolgen. Die Ergebnisse von FTA und RBD sind direkt ineinander überführbar. Aus den Serienverschaltungen des RBD werden dabei ODER-Verknüpfungen im Fehlerbaum und aus den Parallelschaltungen UND-Verknüpfungen. Der in Abbildung 4 dargestellte Fehlerbaum entspricht dem RBD aus Abbildung 3. Trotzdem sind beide Methoden von der Art der Herangehensweise her konträr. Die Herangehensweise ist beim Blockdiagramm induktiv, d.h. die Ausgangsbasis bildet das Komponentenausfallverhalten, von dem aus dann das Systemausfallverhalten ermittelt wird (Bottom-up-Methode). Im Unterschied dazu handelt es sich beim Vorgehen nach der Fehlerbaummethode um eine deduktive Herangehensweise. Die Ausgangsbasis ist hier der Systemausfall, von dem aus dann ermittelt wird, welche Komponentenausfälle zu diesem führen können (Top-down-Methode). Mit einem Fehlerbaum kann daher analog zum Blockdiagramm die Zeitverfügbarkeit eines nicht-reparierbaren Systems berechnet werden, bei dem die Komponentenausfälle unabhängig voneinander sind [37].

Petri-Netz

Petri-Netze sind laut Definition gerichtete Graphen mit zwei disjunkten Mengen von Knoten (Stellen und Transitionen) und einer Menge von gerichteten Kanten (Flußrelationen) zwischen den Elementen der Knotenmengen. Durch das Netz werden Informationen transportiert und zwar so, daß die Stellen als Puffer fungieren und die Transitionen als Verarbeiter dieser. Hierdurch ist es möglich das Wirkgefüge komplexer Systeme darzustellen und zu simulieren, indem die Netze als Darstellung der logischen Verknüpfung von Bedingungen für Ausfallgeschehen oder Ausfallkonsequenzen dienen [13].

Markov-Analyse

Die Markov-Analyse geht davon aus, daß ein System verschiedene Zustände annehmen kann. Diese werden unterschieden in funktionsfähige und ausgefallene Zustände, wodurch diese Methode auch auf reparierbare Systeme angewendet werden kann. Zwischen diesen Zuständen existieren nun Übergänge, die mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit stattfinden. Dies führt auf ein Differentialgleichungssystem, dessen Lösung allerdings nicht trivial ist, da Ausfall- und Reparaturraten nicht konstant sind [22].

Erweiterte und kombinierte Methoden

Die oben aufgeführten Einschränkungen der einzelnen Methoden führten konsequenterweise dazu, Verfahren und Vorschriften zu entwickeln, diese zu umgehen. So ist es mit Semi-Markovschen Modellen auch möglich, Systeme zu berechnen, bei denen entweder Ausfall- oder aber Reparaturrate nicht konstant sind. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die nicht-konstanten Übergangsraten zu "markovisieren", d.h. sie durch ein Markov-Problem zu substituieren. Hier bietet sich die Methode der Zusatzvariablen, die Stufenmethode oder die Methode der eingebetteten Markovschen Ketten an. Auch Fehlerbaum und Zuverlässigkeitsblockdiagramm lassen sich nicht nur auf nicht-reparierbare Systeme anwenden, wenn die Berechnung nicht analytisch erfolgen soll. So ist es üblich, die Berechnung mit Monte-Carlo-Simulation durchzuführen.

3 Lösungsvorschlag für ein Gesamtmodell

3.1 Methoden der Verfügbarkeitsmodellierung

Aufgrund bestimmter Einschränkungen der in 2.2.2 vorgestellten Methoden sind einige von ihnen nicht dazu geeignet, die Zeit- und Arbeitsverfügbarkeit des Systems "Kraftwerk" zu ermitteln.

Als Erstes besteht natürlich die Forderung nach einer quantitativen Aussagemöglichkeit über die Verfügbarkeit des Systems, da ohne sie ein Vergleich der Zeit- und Arbeitsverfügbarkeit bei verschiedenen Szenarios nicht realisierbar ist. Außerdem wird dadurch auch die größte zukünftige Erweiterbarkeit und Verwendbarkeit gewährleistet. So kann ein "quantitatives Modell" auch qualitative Informationen verarbeiten und qualitative Aussagen erlauben, nicht jedoch umgekehrt.

Ein weiteres Auswahlkriterium stellt die Eignung für die Berechnung von reparierbaren Systemen dar. Es handelt sich bei einem Kraftwerk um eine komplexe Anlage, deren Komponenten schon aus rein wirtschaftlichen Gründen repariert werden, wenn sie ausgefallen sind. Vielmehr noch werden die Komponenten einer regelmäßigen Inspektion oder auch vorbeugenden Instandhaltung unterzogen, um Ausfälle soweit wie möglich zu verhindern. Bei redundanten Komponenten (Parallelschaltung), bei denen der Ausfall einer Komponente nicht zum Systemausfall führt, ist es zum Beispiel angestrebt, die ausgefallene Komponente zu reparieren, bevor die noch intakte Komponente auch ausfällt.

Da verschiedene Verschaltungen untersucht werden sollen und diese Änderungen sich nicht nur auf bestimmte Teile des Modells auswirken sollen, muß auf die Substitution von Schaltungsteilen durch definierte Grundschaltungen ebenso verzichtet werden, wie auf den Einsatz von Näherungsverfahren. Was bleibt, ist die Bestimmung der Verfügbarkeit mit Hilfe von Monte-Carlo-Simulation bei Repräsentation der Schaltung im Fehlerbaum oder Blockdiagramm. Befürchtungen, daß bei der erwarteten Komplexität der zu modellierenden Gesamtanlage die Anwendung des Blockdiagramms nicht sinnvoll ist, da dieses sehr unübersichtlich würde, konnten nicht nachvollzogen werden.

3.2 Methoden der Prozeßmodellierung

Aufgrund der ungenügenden Modellierungsgüte scheidet die Methode der klassischen Übertragungsfunktionen für die Realisierung von Anlagenkomponenten von vornherein aus. Diese Methode wird daher nur eingesetzt, wenn Funktionen von Regelstrecken abgebildet werden.

Die Implementierung der vollständigen partiellen Differentialgleichungen verbietet sich durch den hohen numerischen Aufwand. Außerdem sind generell für die Generierung entsprechender dynamischer Modelle, welche auf Großkomponenten von Kraftwerksanlagen anwendbar sind, Probleme bei der physikalischen Modellbildung zu erwarten. Es wären mit dieser Methode nur Untersuchungen zu Teilkomponenten bei intensiver experimenteller Begleitung denkbar.

Schwerpunkt für die Erzielung einer ausreichenden Modellierungstiefe für die wesentlichen Anlagenumfänge bildet daher die Implementierung gewöhnlicher Differentialgleichungen als Differenzengleichungen über Kontrollvolumina mit abschnittsweise verteilten Ortskoordinaten. Als Vereinfachung kann die Implementierung gewöhnlicher Differentialgleichungen als Differenzengleichungen mit konzentrierten Ortskoordinaten für den Teil der Komponenten angewendet werden, für den einfaches dynamisches Verhalten und einfache Geometrie ausreichen.

3.3 Geeignete Modellierungsmethode

Nachdem in 3.1 und 3.2 bereits eine Vorauswahl unter in Frage kommenden einzelnen Methoden getroffen wurde, muß nun das Vorgehen unter dem Aspekt der Integration von Prozeßdynamik und Verfügbarkeit festgelegt werden.

So stand kein "fertiges" Programm zur Verfügung, daß die Simulation von Zeit- und Arbeits- sowie Leistungsverfügbarkeit als auch der Prozeßdynamik unter einer gemeinsamen Oberfläche ermöglicht, oder gar die Verwendung derselben Modellstruktur für beide Zwecke zuläßt. Um dieses Ziel zu erreichen, muß daher eine Entwicklungsumgebung verwendet werden, die auf komplexe Modellierungsaufgaben zugeschnitten ist. Im Gegensatz zur Schaffung einer eigenen Software hat die Verwendung einer Entwicklungsumgebung für die Modellerstellung einige Vorteile. So ist schon eine grafische Oberfläche vorhanden, die

fertigen Modelle sind leicht auf andere Betriebssysteme portierbar und die Einarbeitung für die Benutzer kann schnell erfolgen. Als nachteilig sind hierbei nur die hohen Kosten und die vergleichsweise schlechtere Performance zu sehen. Die Anwendung einer offenen Modellierungsumgebung ermöglicht es außerdem, den Schwerpunkt auf das eigentliche Modell zu legen und nicht auf die Entwicklung einer grafischen Benutzeroberfläche.

Die einzige verbreitete Entwicklungsumgebung, die Forderung nach einer Möglichkeit der Modellierung von dynamischem Verhalten und Verfügbarkeit erfüllt, ist das Programmpaket "Matlab" mit der Toolbox "Simulink". Die Betonung liegt hier auf "verbreitet", da es viele Tools aus diesem Bereich gibt, worunter sicherlich auch einige sind, die zur Bewältigung der Aufgabe geeignet wären. Weitergehende vergleichende Untersuchung der Eignung solcher Tools wurden jedoch nicht unternommen, da die ausreichende "Verbreitung" am Markt Voraussetzung für den Einsatz war.

Mit Auswahl der Entwicklungsumgebung wird dabei auch die Art der Darstellung des Modells festgelegt: Simulink bietet eine blockorientierte grafische Benutzeroberfläche zur Modellierung dynamischer Systeme. Dadurch ist es möglich, eine Repräsentation des Modells zu wählen, die der verfahrenstechnischen Verschaltung der Anlage entspricht, wobei die Einzelkomponenten durch Simulink-Blöcke dargestellt werden. Da hiermit die Darstellung der Struktur als Abbild des Prozeßfließbildes festliegt – welche auch sehr anschaulich ist – muß das Modell für die Zeit- und Arbeitsverfügbarkeitsberechnung der gleichen Form angepaßt werden. Es ist also nahe liegend, die Repräsentation des Modells der Dynamik zu verwenden und diese um zusätzliche Informationseingabemöglichkeiten zu erweitern. Dies auch deshalb, weil diese Darstellung der eines Zuverlässigkeitsblockdiagramms ähnlich ist und sich somit Synergien für die Berechnung ergeben könnten.

Allerdings entspricht das Prozeßfließbild keineswegs exakt dem Zuverlässigkeitsschaltbild. Zur Verdeutlichung ist in Abbildung 12 ein vereinfachtes Prozeßfließbild eines Kraftwerks mit dazugehörigem Zuverlässigkeitsschaltbild dargestellt.

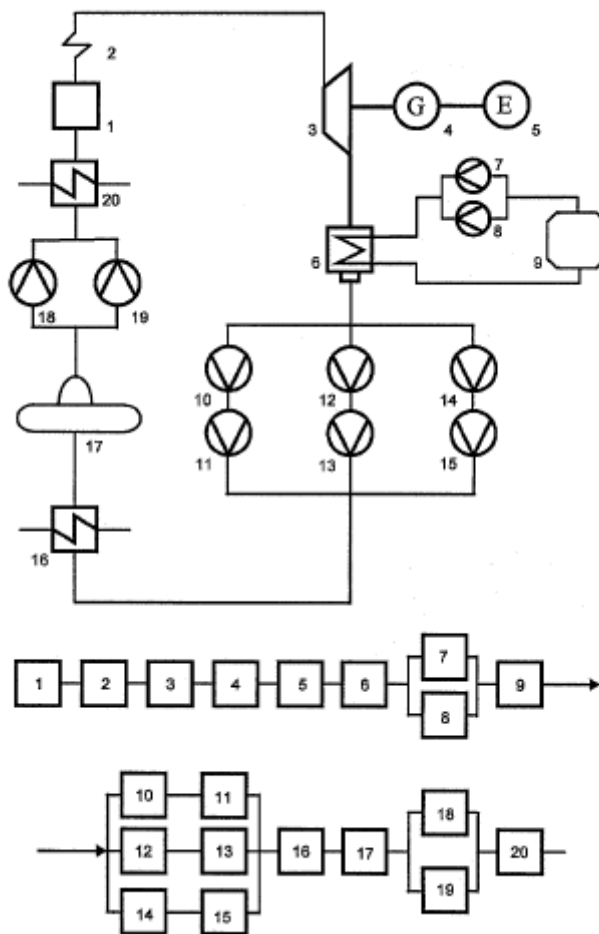


Abbildung 5: Einfacher Kraftwerksprozeß

Wie zu sehen ist, ist es auch für die Bestimmung der Zeit- und Arbeitsverfügbarkeit nicht möglich, auf fertige Lösungen zurückzugreifen, die es für Zuverlässigkeitsschaltbilder gibt. Es müssen daher separate Verfahren implementiert werden, die diese integrierte Modellierung ermöglichen.

3.4 Physikalisch - Technische Grundlagen

3.4.1 Rechenverfahren „stromabwärts“ und „stromaufwärts“

Ein grundlegendes Problem der Prozeßmodellierung sind das grundsätzlich verschiedene Verhalten der Informationsflüsse und die Wirkrichtungen, welche sich einerseits aus den Energie- und Massenbilanzen und andererseits aus der Impulsbilanz für kompressible Medien ergeben. Typisch für Stoff- und Energiefluß ist die Fortpflanzung kleiner Störungen in Strömungsrichtung. Für die Im-

pulsbilanz bzw. die darauf basierende Druckbestimmungsgleichung ergibt sich ein anderes Verhalten – kleine Störungen pflanzen sich entgegen der Strömungsrichtung fort.

In Simulationsumgebungen, welche auf jedem Zeitschritt mit einem Gesamtgleichungssystem des kompletten Prozeßmodells arbeiten, ergibt sich daraus keine Konsequenz für die Gestaltung der Algorithmen und Informationsflüsse, da das Gleichungssystem simultan unter gleichzeitiger Berücksichtigung aller Kopplungen auf jedem Zeitschritt gelöst wird. Simulink stellt allerdings nur sequentielle Lösungsansätze für die mathematisch - numerische Behandlung der Prozeßmodelle bereit.

Zusätzlich kommt hinzu, das die Verbindungsvektoren zwischen den Untersystemen und Blöcken in Simulink numerische Informationen nur in einer Richtung transportieren können. Dies bedeutet, daß während der numerischen Simulation eines Blockes oder Untersystems auf einem Zeitschritt nur Informationsflüsse von solchen Blöcken verfügbar sind, welche direkt verknüpft sind und deren Vektoren jeweils als Eingang behandelt werden können. Außerdem ist ein Spezifikum der graphischen Oberfläche von Simulink, das Ein- und Ausgänge von zu simulierenden Blöcken sich jeweils nur auf gegenüberliegenden Seiten des Blocksymbols befinden können.

Typischerweise muß also bei Verwendung der Standardtechniken von Simulink zur Prozeßmodellierung mit kompressiblen Medien jeder Block mit der doppelten Anzahl Vektoren gegenüber einer R&I - Schaltung versehen werden, um die Berechnung sowohl stromaufwärts, als auch stromabwärts entsprechend den unterschiedlichen Wirkrichtungen von Störung realisieren zu können, siehe z.B. Realisierung entsprechender Modelle für Wärmetauscherdynamik [18], für Frischluft- und Rauchgaswege in [40], oder auch Blockmodelle in [9] und [20]. Auch kann wegen der festen Bindung der Vektoren an die gegenüberliegenden Seiten der Blockaus- und -eingänge der zusätzlich benötigte Satz von Vektoren für die Modellierung des Druckverhaltens nicht parallel zu den Stoffflüssen geführt werden.

Da dies eine starke Beeinträchtigung bei der Umsetzung von R&I - Schaltungen in Simulink - Block - Schaltbilder und vor allem auch bei der weiteren Pflege

und Modifikation solcher Schaltungen darstellt, wurde ein eigenständiger Ansatz zur Behandlung stromaufwärtiger Informationsflüsse und zur Vermeidung zusätzlicher Vektor - „Schleifen“ in den Modellschaltbildern entwickelt.

Dieser Ansatz basiert auf einer dynamischen Zuweisung dynamischer Datenfelder während der Initialisierung frei programmierter sogenannter Simulink-Funktionen zur Abbildung des Prozeßverhaltens von Zeitschritt zu Zeitschritt sowie auf einer automatischen Zuweisung von Ident - Nummern zu allen im Schaltbild befindlichen Vektoren während der gleichen Initialisierung. Diese Vektor – Ident - Nummern werden in den Zustandsvariablen der Simulink-Funktionen gespeichert und als ein Element der verbindenden Vektoren zu den stromabwärtigen Blöcken übermittelt. Da diese Vektor - Ident - Nummern gleichzeitig den Zeilen - Index in den dynamisch zugewiesenen Prozeßdatenfeldern darstellen, kann jeder Block über seine zugehörige Simulink-Funktion Informationen, welche mit den stromabwärtigen Vektoren korrespondieren, aus den globalen Prozeßdatenfeldern lesen und in diese für die stromaufwärtigen Blöcke auch schreiben.

3.4.2 Datenstrukturen für Prozeßmodellierung in Simulink

Simulink als Simulationsplattform für dynamische Systeme hat folgende spezifischen Eigenschaften:

- Simulink ist nicht objektorientiert, sondern entsprechend seiner Herkunft von der Programmiersprache FORTRAN klassisch algorithmisch orientiert;
- das Prozeßmodell wird auf dem jeweiligen Zeitschritt nicht simultan als vollständiges, nichtlineares und implizites Gleichungssystem durch den Löser behandelt, sondern entsprechend seiner Blockstruktur in einer intern festgelegten Reihenfolge sequentiell abgearbeitet;
- Simulink kennt Informationsübermittlung zwischen den Blöcken des Prozeßmodells während der sequentiellen Abarbeitung nur streng in Vektorrichtung.

Für die Vektoren der Prozeßmodelle in diesem Projekt wurde eine spezielle und einheitliche Struktur eingeführt, um den Informationsaustausch zwischen den

Prozeßmodellblöcken z.B. bezüglich der Daten des Stoff- und Wärmetransportes realisieren zu können.

In der Grundstruktur setzen sich diese Vektoren aus 17 Elementen mit folgender Bedeutung zusammen:

1	vid	Vektor - Ident - Nummer
2	fid	Medien - Ident - Nummer
3	m	Massendurchsatz (bei Stofftransport, ansonsten Drehmoment o.ä.)
4	p	Druck
5	h	Enthalpie (bei Stofftransport, ansonsten Drehzahl o.ä.)
6	ctrl	Steuergröße für Hilfsaufgaben
7	1	Mediencharakterisierung bei Stofftransport
8	2	-"-
9	3	-"-
10	4	-"-
11	5	-"-
12	6	-"-
13	7	-"-
14	8	-"-
15	I	zusätzliche Mediencharakterisierung
16	II	-"-
17	III	-"-

Für spezielle Anwendungsbereiche, wie z.B. Feststoff mit Kornspektrum, ist über die zusätzliche Mediencharakterisierung I - III der Zugriff auf einen zweiten Vektorbereich mit ebenfalls 17 Elementen möglich. Auch können insbesondere für die Beschreibung von Gas - Feststoff - Transport Vektoren intern „huckepack“ gebündelt werden.

Die Mediencharakterisierung bei Stofftransport 1 – 8 ist abhängig von der Medien - Ident - Nummer fid. Für Rauchgas hat dieser Vektorabschnitt folgende Bedeutung:

- | | | |
|---|------------------|-----------------------|
| 1 | Ar | - Argon |
| 2 | Ne | - Neon |
| 3 | N ₂ | - Stickstoff |
| 4 | O ₂ | - Sauerstoff |
| 5 | CO | - Kohlenmonoxid |
| 6 | CO ₂ | - Kohlendioxid |
| 7 | H ₂ O | - Wasser als Gasphase |
| 8 | SO ₂ | - Schwefeldioxid. |

Für feste Brennstoffe wurde folgende Bedeutung festgelegt (alle Angaben bezogen auf Rohmasse):

- | | | |
|----|---|---------------|
| 7 | C | - Kohlenstoff |
| 8 | H | - Wasserstoff |
| 9 | S | - Schwefel |
| 10 | O | - Sauerstoff |
| 11 | N | - Stickstoff |
| 12 | W | - Wasser |
| 13 | A | - Asche |

Wie im vorhergehenden Abschnitt beschrieben, wurde ein globales Prozeßdatenfeld zur Abbildung des Stromaufwärts- und Stromabwärtsverhaltens in Simulink - Modellen eingeführt. Der Programmiername dieses Prozeßdatenfeldes ist BCT, die Anzahl Zeilen in BCT entspricht der Anzahl Prozeßvektoren im Blockschaltbild und die Spaltenstruktur in BCT entspricht der beschriebenen Vektorstruktur des Prozeßmodells. Bei diesem Ansatz der Datenspeicherung für die Simulation befindet sich in BCT immer ein „Spiegel“ aller Prozeßvektoren.

Ausgehend von dem speziellen Prozeßdatenhandling, welches den Simulink-Standard wesentlich erweitert, ist es zwingend, daß im wesentlichen alle Prozeßmodellblöcke einschließlich der Blöcke zum Setzen von Randbedingungen (Zu- und Abströmungen, Mediendefinition, Zeitfunktionen) als sogenannte Simulink-Funktionen in freier Programmierung realisiert werden. Dies ist erforderlich, da in die Standardkomponenten aus den Simulink-Bibliotheken keine Initialisierungsprozeduren für die Vektor - Ident - Nummern und keine Update-Prozeduren für Felder in der Art der BCT implementiert sind. Ausnahmen von dieser generellen Regel sind nur solche Bibliothekskomponenten wie numerische und graphische Anzeigeelemente.

4 Modellentwicklung und Anwendung auf eine Komponentenbibliothek

4.1 Basismodelle physikalisch - technischer Komponenten

Die hier aufgeführten Basismodelle

- Fluidspeicherung in Volumenelementen
- Fluidreibung und Fluidbeschleunigung in Strömungspfaden
- Wärmeübergang und Wärmespeicherung in festen Wänden

beinhalten die Grundgleichungen zum Beschreiben prozeßdynamischen Verhaltens, welche sich aus der Anwendung der Methodik Gewöhnlicher Differentialgleichungen mit konzentrierten Ortskoordinaten ergeben. Damit bilden sie die Basis für alle spezifischen Komponentenimplementierungen, welche in den Abschn. 4.3 ff. in Einzelnen erläutert werden.

Ergänzend ist im folgenden Abschnitt außerdem das Basismodell für die Gleichungen einer Sprungantwort dargelegt, da es für die Beschreibung vereinfachter Komponenten Verwendung findet, deren prozeßdynamisches Verhalten approximativ auf Gewöhnliche Differentialgleichungen 1. Ordnung zurückgeführt werden kann. Dies ist z.B. bei der Abbildung zeitvariabler Randbedingungen oft möglich.

4.1.1 Sprungantwortmodell

Das Sprungantwortmodell basiert auf einer gewöhnlichen Differentialgleichung 1. Ordnung, welche das Verhalten eines linearen Systems mit einer abhängigen und einer unabhängigen Variablen sowie zeitinvarianten Koeffizienten beschreibt:

$$a_1 \cdot \frac{dy}{dt} + a_0 \cdot y = u(t) \quad (1)$$

Die dazugehörige Startwertbedingung zum Zeitpunkt $t=0$ ist

$$y(0) = y_0 \quad (2)$$

Die analytische Lösung wird über die Nullstelle der Charakteristik der Differentialgleichung hergeleitet:

$$a_1 \cdot p + a_0 = 0 \quad (3)$$

Damit ist die generelle Form der homogenen Lösung

$$y_h(t) = K_1 \cdot e^{(p_1 \cdot t)} \quad (4)$$

sowie die singuläre Wurzel der charakteristischen Gleichung

$$p_1 = -a_0 / a_1 \quad (5)$$

Nach Parametersubstitution kann die Sprungantwort über Startwert und stationären Gleichgewichtszustand sowie die Zeitkonstante $T_{63} = (-p_1)^{-1}$ beschrieben werden:

$$y(t) = y_{ss} - (y_{ss} - y_0) \cdot e^{(-t / T_{63})} \quad (6)$$

Die Zeitkonstante T_{63} ist dabei der Zeitabschnitt, nachdem die Ausgangsgröße des dynamischen Systems 63 % der Sprungantwort erreicht hat.

4.1.2 Fluidspeicherung in Volumenelementen

Grundgleichung für die Änderung des absoluten Druckes im Volumenelement ist die Bilanz der ein- und ausgehenden Volumenströme.

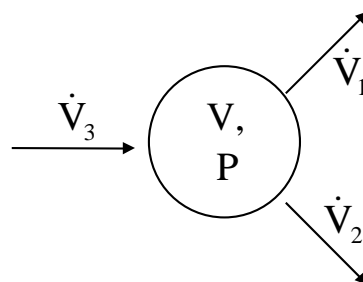


Abbildung 6: Bilanz am Volumenelement

Parametriert wird das Volumenelement durch seinen Volumeninhalt und den Elastizitätskoeffizienten des Fluids

$$C_f = V / \beta \quad (7)$$

Die Verknüpfung zwischen Dichte und Druck erfolgt auf der Annahme isothermen Zustandsänderung in einem ausreichend kleinen Zeitintervall

$$\frac{dp}{dt} \sim \frac{d\rho}{dt} \quad (8)$$

Damit kann die Bilanz der Volumenströme über die Fluidspeicherkapazität C_f mit dem Druck im Volumenelement instationär gekoppelt werden:

$$\dot{V}_{\text{kum}} = \sum_i \dot{V}_i = C_f \cdot \frac{dp}{dt} \quad (9)$$

4.1.3 Fluidreibung und -beschleunigung in Strömungspfaden

Der grundlegende Ansatz für die Änderung des Volumenstromes in einem Strömungspfad zwischen zwei Speichervolumina ist die Superposition eines Strömungswiderstandes und einer Massenträgheit des Fluids.

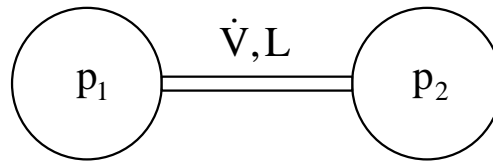


Abbildung 7: Bilanz am Strömungspfad

Der Strömungswiderstand kann durch Länge und Widerstandsbeiwert oder auch vereinfacht unter Voraussetzung voll turbulenter Strömungsregime durch Bezug auf nominale Prozeßgrößen parametrisiert werden.

$$\begin{aligned} \Delta p &= p_2 - p_1 \\ R &= \dot{V}_0^n / \Delta p_0 \end{aligned} \quad (10)$$

Die Massenträgheit ist durch Strömungsweglänge und -querschnitt zu parametrisieren. Dabei steht der Korrekturfaktor k für die Form des Strömungsprofils mit $k=1$ für die Kolbenströmung und $k=2$ für die ideal laminare Strömung mit parabolischem Geschwindigkeitsprofil. In der Praxis ist also für die dominierende voll ausgebildete turbulente Strömung ein Wert nahe 1 zu setzen.

$$I = k \cdot L \cdot \rho / A \quad (11)$$

Damit ergibt die Superposition eine Differentialgleichung für den Volumenstrom

$$\Delta p = I \cdot \frac{d\dot{V}}{dt} + R \cdot \dot{V}^n \quad (12)$$

Die Implementierung erfolgt über ein Sprungantwortmodell mit der Zeitkonstanten $T_{63} = I / R$.

4.1.4 Wärmeübergang und -speicherung in festen Wänden

Der Wärmedurchgang durch eine trennende Wand eines Wärmetauschers oder auch eines Behälters wird vollständig in Teilprozesse entkoppelt:

- Wärmeübergang zwischen Fluid (jeweils kalte und heiße Seite) und Wand entsprechend der treibenden Temperaturdifferenz;
- Temperaturänderung der Wand entsprechend der Bilanz der Wärmeströme als Speichervorgang.

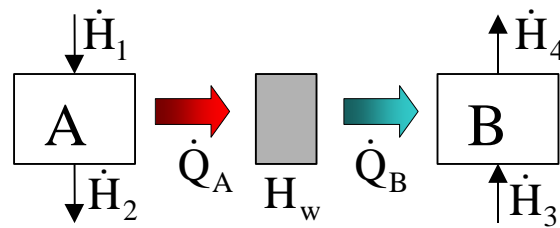


Abbildung 8: Bilanz am Wandelement

Die Wand wird mit Volumen und Dichte, d.h. ihrer Masse, sowie ihrer spezifischen Wärmekapazität parametrisiert:

$$H_w = V_w \cdot \rho_w \cdot c_{p,w} \cdot (T_w - T_B) \quad (13)$$

Damit ergibt sich die Bilanz der Gesamtenthalpie der Wand zu

$$\frac{dH_w}{dt} = \sum_i \dot{Q}_i \quad (14)$$

Unter Voraussetzung, daß der fluidseitige Wärmeübergang gegenüber der Wärmeleitung in der Wand das Komponentenverhalten dominiert, ergeben sich die einzelnen Wärmeströme zur bzw. von der Wand aus Übergangskoeffizient, Wärmeaustauschfläche und treibende Temperaturdifferenz:

$$\dot{Q} = \alpha \cdot A \cdot (T_w - T) \quad (15)$$

Dabei ist die repräsentative Fluidtemperatur T iterativ über eine Stoffwertgleichung mit der Enthalpiebilanz der Fluidseite abzugleichen, z.B. für die Seite A in Abbildung 8:

$$\frac{dH_A}{dt} = \dot{H}_1 - \dot{H}_2 - \dot{Q}_A \quad (16)$$

Da Temperatur der Wand konstant gleich der mittleren Wandtemperatur angenommen wird, ist für die Ermittlung aller Teilbilanzen die strömungsseitige Verschaltung des Wärmetauschers unerheblich - für die Berücksichtigung der Unterschiede zwischen Gegenstrom, Gleichstrom bzw. Kreuzstrom ist deshalb das Komponentenmodell intern in Teilmodelle zu Splitten und mit abschnittsweise konstanten Parametern zu modellieren! In diesem Fall ist es auch zulässig die Fluidtemperatur T abschnittsweise gleich dem arithmetischen Mittel zwischen Eintritts- und Austrittstemperatur zu setzen.

4.2 Komponentenbibliothek - Realisierung und Beschreibung

Die Gruppe LEITUNGEN enthält die Komponenten

- Rohrleitung
- Drossel
- Verzweigung
- Zusammenführung.

Der Komponente ROHRLEITUNG kommt dabei eine grundlegende Bedeutung zu, da hier der prinzipielle Aufbau aller Komponenten als Aufteilung in die Teilmodelle Speichervolumen und Strömungspfad als Basiskomponente realisiert ist.

Auf Grund der Tatsache, daß in einer Gesamtschaltung zu Simulation des Prozeßverhaltens Speichervolumina und Strömungspfade jeweils abwechselnd miteinander verknüpft sein müssen, erfolgt mit dieser Komponente auch die Festlegung, daß in der Matlab/Simulink-Implementierung sich das Speichervolumen immer an der Eintrittsseite des Simulink-Blockes und der Strömungspfad sich immer an der Austrittsseite desselben befindet (entspricht der optischen Darstellung im Simulink-Schaltbild durch Block und abgehenden Vektor).

Die Gruppen WÄRMETAUSCHER und TURBOMASCHINEN enthalten die Komponenten

- Luft- / Wasservorwärmer
- Kondensator
- Entgaser
- Kühlturm
- Vollbeaufschlagte Stufengruppe mit Wirkungsgradkennlinie
- Vollbeaufschlagte Stufengruppe mit Anzapfung
- Einfache Pumpe

- Pumpe mit Anzapfung
- Lüfter und Saugzug.

Mit diesen wärmetechnischen und maschinentechnischen Komponenten können zusammen mit den Leitungskomponenten wesentliche Teile sowohl des Wasser- und Dampfkreislaufes als auch des Luft- und Rauchgastraktes eines Kraftwerkes abgebildet werden.

Die Gruppe DAMPFERZEUGER enthält die Komponenten

- Ein-Phasen-Heizfläche
- Verdampfer
- Wasserabscheider
- Einspritzung
- Brenner

Mit diesen Komponenten wird die wärmetechnische Kopplung des Wasser- und Dampfkreislaufes mit der Energiefreisetzung im Luft- und Rauchgastrakt ermöglicht.

Die Gruppe RANDBEDINGUNGEN enthält die Komponenten

- Zuströmung
- Abströmung
- Wärmesenke.

Diese Komponenten dienen dazu, bei der dynamischen Prozeßsimulation offener Systeme die Schnittstellen in der Form von Zuständen und Flüssen zu definieren. Außerdem müssen für strömende Medien an den Systemgrenzen die jeweilige Medienart zugeordnet werden, da die Prozeßkomponenten in der Regel medienneutral implementiert sind und die aktuelle Medienbelegung erst in der Initialisierungsphase der Simulation erfolgt.

4.3 Leitungen

4.3.1 Rohrleitung

Die Komponente Rohrleitung dient zur Verknüpfung der weiteren Hauptkomponenten im Prozeßschaltbild unter Berücksichtigung der Fluideinspeicherung bzw. Fluidausspeicherung, Fluidreibung und Beschleunigung der Fluidmasse.

Charakteristisch für die Rohrleitung ist, daß die Reibungs- und Beschleunigungseffekte gegenüber den Speichereffekten überwiegen.

Die Ein- oder Auskopplung von Wärme-flüssen ist nicht vorgesehen, es kann allerdings ersatzweise über die Länge der Rohrleitung ein absoluter Temperaturabfall vorgegeben werden.

Vektoren	1	Index Strömungsaustritt
	2	Index Strömungseintritt
Parameter	\dot{m}_0	Nenndurchsatz
	$t_{e,0}$	Nenntemperatur am Eintritt
	$p_{e,0}$	Nenndruck am Eintritt
	Δp_0	Nenndruckverlust
	V	Volumen
	l	Leitungslänge
	Δt_a	Temperaturabfall

Elementargleichung des idealen Speichervolumens

$$\Sigma \dot{V}_{21} = C_f \frac{dp}{dt} \quad (17)$$

Volumenstrombilanz am Speichervolumen

$$\Sigma \dot{V}_{21} = (\dot{m}_2 - \dot{m}_1) / \rho_2 \quad (18)$$

Fluidkapazität

$$C_f = \frac{V}{\beta} + C_w \quad (19)$$

Wandelastizität

$$C_w = 0 \quad (20)$$

Fluider Elastizitätsmodul

$$\beta = p_2 \quad (21)$$

Elementargleichung des idealen Reibungselements

$$\Delta p_{21} = R_f \cdot \dot{V}_1 \quad (22)$$

$$\dot{V}_1 = \dot{m}_1 / \rho_{21} \quad (23)$$

$$\rho_{21} = \rho(\frac{1}{2}(p_1 + p_2), h_2) \quad (24)$$

Widerstandskenngröße

$$\Delta p_0 = R_f \cdot \dot{V}_{10} \quad (25)$$

$$\dot{V}_{10} = \dot{m}_{10} / \rho_{210} \quad (26)$$

$$\rho_{210} = \rho(\frac{1}{2}(p_{10} + p_{20}), h_{20}) \quad (27)$$

Trägheitsgleichung (Impulsbilanz)

$$p_{21} = I \cdot \left(\frac{d\dot{V}_{21}}{dt} \right) \quad (28)$$

$$\dot{V}_{21} = \frac{\dot{m}_1}{\rho_{21}} \quad (29)$$

Trägheitskenngröße

$$I = 2 \cdot \left(\frac{\rho_{21}}{A} \right) \cdot l \quad (30)$$

$$A = \frac{V}{l} \quad (31)$$

Temperaturbedingung

$$t_1 = t_2 - \Delta t_a \quad (32)$$

4.3.2 Drossel

Die Komponente Drossel basiert auf der Komponente Rohrleitung (unter Berücksichtigung der Fluideinspeicherung bzw. Fluidausspeicherung, Fluidreibung und Beschleunigung der Fluidmasse).

Charakteristisch für die Drossel ist, daß zusätzlich zu den Kenndaten der Rohrleitung hier noch eine veränderliche relative Querschnittsverengung als Parameter übergeben werden kann.

Die Ein- oder Auskopplung von Wärme-flüssen ist nicht vorgesehen, es kann auch kein Temperaturabfall vorgegeben werden.

Vektoren	1	Index Strömungsaustritt
	2	Index Strömungseintritt
Parameter	\dot{m}_0	Nenndurchsatz
	$t_{e,0}$	Nenntemperatur am Eintritt
	$p_{e,0}$	Nenndruck am Eintritt
	Δp_0	Nenndruckverlust
	V	Volumen
	l	Leitungslänge
	a	spezifischer Querschnittsparameter

Elementargleichung des idealen Speichervolumens

$$\Sigma \dot{V}_{21} = C_f \frac{dp}{dt} \quad (33)$$

Volumenstrombilanz am Speichervolumen

$$\Sigma \dot{V}_{21} = (\dot{m}_2 - \dot{m}_1) / \rho_2 \quad (34)$$

Fluidkapazität

$$C_f = \frac{V}{\beta} + C_w \quad (35)$$

Wandelastizität

$$C_w = 0 \quad (36)$$

Fluider Elastizitätsmodul

$$\beta = p_2 \quad (37)$$

Elementargleichung des idealen Reibungselements

$$\Delta p_{21} = R_f \cdot \dot{V}_1 \quad (38)$$

$$\dot{V}_1 = \dot{m}_1 / \rho_{21} \quad (39)$$

$$\rho_{21} = \rho(\frac{1}{2}(p_1 + p_2), h_2) \quad (40)$$

Widerstandskenngröße

$$\Delta p_0 = R_f \cdot \dot{V}_{10} \quad (41)$$

$$\dot{V}_{10} = \dot{m}_{10} \cdot a / \rho_{210} \quad (42)$$

$$\rho_{210} = \rho(\frac{1}{2}(p_{10} + p_{20}), h_{20}) \quad (43)$$

Trägheitsgleichung (Impulsbilanz)

$$p_{21} = I \cdot \left(\frac{d\dot{V}_{21}}{dt} \right) \quad (44)$$

$$\dot{V}_{21} = \frac{\dot{m}_1}{\rho_{21}} \quad (45)$$

Trägheitskenngröße

$$I = 2 \cdot \left(\frac{\rho_{21}}{A} \right) \cdot l \quad (46)$$

$$A = \frac{V}{l} \quad (47)$$

Enthalpiebedingung

$$h_1 = h_2 \quad (48)$$

4.3.3 Verzweigung

Die Komponente Verzweigung dient zur Aufteilung eines Eintrittsfluidstromes in zwei Austrittsfluidströme. Dabei basiert die Komponente Verzweigung in ihren Teilmodellen auf der Komponente Rohrleitung (unter Berücksichtigung der Fluideinspeicherung bzw. Fluidausspeicherung, Fluidreibung und Beschleunigung der Fluidmasse).

Charakteristisch für die Verzweigung ist, daß die Aufteilung der beiden Nennaustrittsmassenströme entsprechend der Nenndruckverluste der beiden Abzweige erfolgt.

Die Ein- oder Auskopplung von Wärmeflüssen ist nicht vorgesehen, es kann auch kein Temperaturabfall vorgegeben werden.

Vektoren	1	Index Strömungsausritt 1
	2	Index Strömungsausritt 2
	3	Index Strömungseintritt
Parameter	\dot{m}_0	Nenndurchsatz gesamt
	$t_{e,0}$	Nenntemperatur am Eintritt
	$p_{e,0}$	Nenndruck am Eintritt
	Δp_{10}	Nenndruckverlust Teilstrom 1
	Δp_{20}	Nenndruckverlust Teilstrom 2
	V	Volumen
	l_1	Leitungslänge Teilstrom 1
	l_2	Leitungslänge Teilstrom 2

Elementargleichung des idealen Speichervolumens

$$\Sigma \dot{V}_3 = C_f \frac{dp_3}{dt} \quad (49)$$

Volumenstrombilanz am Speichervolumen

$$\Sigma \dot{V}_3 = (\dot{m}_3 - \dot{m}_1 - \dot{m}_2) / \rho_3 \quad (50)$$

Fluidkapazität

$$C_f = \frac{V}{\beta} + C_w \quad (51)$$

Wandelastizität

$$C_w = 0 \quad (52)$$

Fluider Elastizitätsmodul

$$\beta = p_3 \quad (53)$$

Elementargleichung des idealen Reibungselements

$$\Delta p_{31} = R_f \cdot \dot{V}_1 \quad (54)$$

$$\dot{V}_1 = \dot{m}_1 / \rho_{31} \quad (55)$$

$$\rho_{31} = \rho(\sqrt[1]{2}(p_1 + p_3), h_3) \quad (56)$$

$$\Delta p_{32} = R_f \cdot \dot{V}_2 \quad (57)$$

$$\dot{V}_2 = \dot{m}_2 / \rho_{32} \quad (58)$$

$$\rho_{32} = \rho(\sqrt[1]{2}(p_3 + p_2), h_3) \quad (59)$$

Widerstandskenngröße

$$\Delta p_{10} = R_f \cdot \dot{V}_{10} \quad (60)$$

$$\dot{V}_{10} = \dot{m}_{10} / \rho_{310} \quad (61)$$

$$\dot{m}_{10} = \frac{\dot{m}_0}{1 + \Delta p_{20} / \Delta p_{10}} \quad (62)$$

$$\rho_{310} = \rho(\sqrt[1]{2}(p_{10} + p_{30}), h_{30}) \quad (63)$$

$$\Delta p_{20} = R_f \cdot \dot{V}_{20} \quad (64)$$

$$\dot{V}_{20} = \dot{m}_{20} / \rho_{320} \quad (65)$$

$$\dot{m}_{20} = \dot{m}_0 - \dot{m}_{10} \quad (66)$$

$$\rho_{320} = \rho(1/2(p_{30} + p_{20}), h_{30}) \quad (67)$$

Trägheitsgleichung (Impulsbilanz)

$$p_{31} = I_1 \cdot \left(\frac{d\dot{V}_{31}}{dt} \right) \quad (68)$$

$$\dot{V}_{31} = \frac{\dot{m}_1}{\rho_{31}} \quad (69)$$

$$p_{32} = I_2 \cdot \left(\frac{d\dot{V}_{32}}{dt} \right) \quad (70)$$

$$\dot{V}_{32} = \frac{\dot{m}_2}{\rho_{32}} \quad (71)$$

Trägheitskenngröße

$$I_1 = 2 \cdot \left(\frac{\rho_{31}}{A_1} \right) \cdot I_1 \quad (72)$$

$$A_1 = \frac{V}{I_1} \quad (73)$$

$$I_2 = 2 \cdot \left(\frac{\rho_{32}}{A_2} \right) \cdot I_2 \quad (74)$$

$$A_2 = \frac{V}{I_2} \quad (75)$$

Enthalpiebedingung

$$h_1 = h_3 \quad (76)$$

$$h_2 = h_3 \quad (77)$$

4.3.4 Zusammenführung

Die Komponente Zusammenführung dient zur stofflichen und thermischen Mischung zweier Eintrittsfluidströme. Dabei basiert die Komponente Zusammenführung in ihren Teilmodellen auf der Komponente Rohrleitung (unter Berücksichtigung der Fluideinspeicherung bzw. Fluidausspeicherung, Fluidreibung und Beschleunigung der Fluidmasse).

Charakteristisch für die Zusammenführung ist, daß die Mischung der beiden Teilströme wie in einem idealen Rührkessel erfolgt.

Die Ein- oder Auskopplung von Wärme-flüssen ist nicht vorgesehen, es kann auch kein Temperaturabfall vorgegeben werden.

Vektoren	1	Index Strömungsaus-tritt
	2	Index Strömungsein-tritt A
	3	Index Strömungsein-tritt B
Parameter	\dot{m}_0	Nenndurchsatz gesamt
	$t_{e,0}$	Nenntemperatur am Eintritt
	$p_{e,0}$	Nenndruck am Eintritt
	Δp_0	Nenndruckverlust
	V	Volumen
	l	Leitungslänge

Elementargleichung des idealen Speichervolumens

$$\Sigma \dot{V}_{23} = C_f \frac{dp_{23}}{dt} \quad (78)$$

Volumenstrombilanz am Speichervolumen

$$\Sigma \dot{V}_{23} = (\dot{m}_2 + \dot{m}_3 - \dot{m}_1) / \rho_{23} \quad (79)$$

Fluidkapazität

$$C_f = \frac{V}{\beta} + C_w \quad (80)$$

Wandelastizität

$$C_w = 0 \quad (81)$$

Fluider Elastizitätsmodul

$$\beta = p_{23} \quad (82)$$

Elementargleichung des idealen Reibungselements

$$\Delta p_{21} = R_f \cdot \dot{V}_1 \quad (83)$$

$$\dot{V}_1 = \dot{m}_1 / \rho_{21} \quad (84)$$

$$\rho_{21} = \rho(\frac{1}{2}(p_1 + p_2), h_2) \quad (85)$$

Widerstandskenngröße

$$\Delta p_{210} = R_f \cdot \dot{V}_{210} \quad (86)$$

$$\dot{V}_{210} = \dot{m}_{10} / \rho_{210} \quad (87)$$

$$\rho_{210} = \rho(\frac{1}{2}(p_{10} + p_{20}), h_{20}) \quad (88)$$

Trägheitsgleichung (Impulsbilanz)

$$p_{21} = I \cdot \left(\frac{d\dot{V}_{21}}{dt} \right) \quad (89)$$

$$\dot{V}_{21} = \frac{\dot{m}_1}{\rho_{21}} \quad (90)$$

Trägheitskenngröße

$$I = 2 \cdot \left(\frac{\rho_{21}}{A} \right) \cdot l \quad (91)$$

$$A = \frac{V}{l} \quad (92)$$

Mischenthalpie

$$h_1 = \frac{(h_2 \cdot \dot{m}_2 + h_3 \cdot \dot{m}_3)}{\dot{m}_{23}} \quad (93)$$

$$\dot{m}_{23} = \dot{m}_2 + \dot{m}_3 \quad (94)$$

4.4 Wärmetauscher

4.4.1 Luft- / Wasservorwärmer

Die Komponente Vorwärmer dient zur Übertragung von Wärmeströmen zwischen zwei Medien. Die Zuordnung der Medien zur „kalten“ bzw. „heißen“ Strömungsseite (Luft, Wasser, Dampf ...) erfolgt dabei während der Initialisierungsphase der Simulation entsprechend der Zuordnung der Medienkennzahlen in den Zuströmungen an den Systemgrenzen.

Die Berechnung der strömenden Medien erfolgt analog der Komponente Rohrleitung unter Berücksichtigung der Fluidein- bzw. -ausspeicherung, Fluidreibung und Beschleunigung der Fluidmasse sowie der Ein- und Auskopplung von Wärmequellen.

Für das Heizmedium wird vorausgesetzt, daß die Wärmeauskopplung durch Kondensation erfolgt.

Vektoren	1	Index Strömungsausstritt Kühlmedium
	2	Index Strömungsausstritt Heizmedium
	3	Index Strömungseintritt Kühlmedium
	4	Index Strömungseintritt Heizmedium
Parameter	\dot{m}_w	Nenndurchsatz Kühlmedium
	$t_{e,0}$	Nenntemperatur am Eintritt Kühlmedium
	$p_{e,0}$	Nenndruck am Eintritt Kühlmedium
	Δp_w	Nenndruckverlust Kühlmedium
	Δt_w	Nennaufwärmspanne
	V_w	Volumen Kühlmedium
	l_w	Leitungslänge Kühlmedium
	\dot{m}_s	Nenndurchsatz Heizmedium
	$p_{s,0}$	Nenndruck Heizmedium
	Δp_s	Nenndruckverlust Heizmedium

V_s	Volumen Heizmedium
l_s	Leitungslänge Heizmedium

Elementargleichung des idealen Speichervolumens Kühlmedium

$$\Sigma \dot{V}_{31} = C_f \frac{dp_3}{dt} \quad (95)$$

Volumenstrombilanz am Speichervolumen Kühlmedium

$$\Sigma \dot{V}_{31} = (\dot{m}_3 - \dot{m}_1) / \rho_3 \quad (96)$$

Fluidkapazität Kühlmedium

$$C_f = \frac{V_w}{\beta} + C_w \quad (97)$$

Wandelastizität Kühlmedium

$$C_w = 0 \quad (98)$$

Fluider Elastizitätsmodul Kühlmedium

$$\beta = p_3 \quad (99)$$

Elementargleichung des idealen Speichervolumens Heizmedium

$$\Sigma \dot{V}_{42} = C_f \frac{dp_4}{dt} \quad (100)$$

Volumenstrombilanz am Speichervolumen Heizmedium

$$\Sigma \dot{V}_{42} = (\dot{m}_4 - \dot{m}_2) / \rho_4 \quad (101)$$

Fluidkapazität Heizmedium

$$C_f = \frac{V_s}{\beta} + C_w \quad (102)$$

Wandelastizität Heizmedium

$$C_w = 0 \quad (103)$$

Fluider Elastizitätsmodul Heizmedium

$$\beta = p_4 \quad (104)$$

Elementargleichung des idealen Reibungselements Kühlmedium

$$\Delta p_{31} = R_{f,w} \cdot \dot{V}_1 \quad (105)$$

$$\dot{V}_1 = m_1 / \rho_{31} \quad (106)$$

$$\rho_{31} = \rho(\frac{1}{2}(p_1 + p_3), h_3) \quad (107)$$

Widerstandskenngröße Kühlmedium

$$\Delta p_{w,0} = R_{f,w} \cdot \dot{V}_{10} \quad (108)$$

$$\dot{V}_{10} = m_{10} / \rho_{310} \quad (109)$$

$$\rho_{310} = \rho(\frac{1}{2}(p_{10} + p_{30}), h_{30}) \quad (110)$$

Elementargleichung des idealen Reibungselements Heizmedium

$$\Delta p_{42} = R_{f,s} \cdot \dot{V}_2 \quad (111)$$

$$\dot{V}_2 = m_2 / \rho_{42} \quad (112)$$

$$\rho_{42} = \rho(\frac{1}{2}(p_2 + p_4), h_4) \quad (113)$$

Widerstandskenngröße Heizmedium

$$\Delta p_{s,0} = R_{f,s} \cdot \dot{V}_{20} \quad (114)$$

$$\dot{V}_{20} = m_{20} / \rho_{420} \quad (115)$$

$$\rho_{420} = \rho(\frac{1}{2}(p_{20} + p_{40}), h_{40}) \quad (116)$$

Trägheitsgleichung (Impulsbilanz) Kühlmedium

$$p_{31} = I_s \cdot \left(\frac{d\dot{V}_{31}}{dt} \right) \quad (117)$$

$$\dot{V}_{31} = \frac{\dot{m}_1}{\rho_{31}} \quad (118)$$

Trägheitskenngröße Kühlmedium

$$I_s = 2 \cdot \left(\frac{\rho}{A_s} \right) \cdot I_s \quad (119)$$

$$A_s = \frac{V_s}{I_s} \quad (120)$$

Trägheitsgleichung (Impulsbilanz) Heizmedium

$$p_{42} = I_w \cdot \left(\frac{d\dot{V}_{42}}{dt} \right) \quad (121)$$

$$\dot{V}_{42} = \frac{\dot{m}_2}{\rho_{42}} \quad (122)$$

Trägheitskenngröße Heizmedium

$$I_w = 2 \cdot \left(\frac{\rho}{A_w} \right) \cdot I_w \quad (123)$$

$$A_w = \frac{V_w}{I_w} \quad (124)$$

Energiebilanz

$$q_0 = \dot{m}_w \cdot (h(p_{e,0} - \Delta p_w, t_{e,0} + \Delta t_w) - h(p_{e,0}, t_{e,0})) \quad (125)$$

$$\Delta t_{s,0} = \Delta t_w = \ln \left(\frac{t_{s,0} - t_{e,0}}{t_{s,0} - t_{e,0} - \Delta t_w} \right) \quad (126)$$

$$k \cdot A = \frac{q_0}{\Delta t_{s,0}} \quad (127)$$

$$\Delta h_v = h_4 - h'(p_4) \quad (128)$$

$$\Delta t_s = \Delta h_v \cdot \frac{\dot{m}_4}{k \cdot A} \quad (129)$$

4.4.2 Kondensator

Die Komponente Kondensator stellt einen wassergekühlten Wärmeübertrager für Dampf dar. Diese Komponente wird dem Abdampfaustritt einer Kondensati-

onsdampfturbine nachgeschaltet, um diesen Abdampf als Kondensat niederzuschlagen.

Die Berechnung der strömenden Medien erfolgt analog der Komponente Rohrleitung unter Berücksichtigung der Fluidein- bzw. -ausspeicherung, Fluidreibung und Beschleunigung der Fluidmasse sowie der Ein- und Auskopplung von Wärme-flüssen.

Vektoren	1	Index Kühlwasseraustritt
	2	Index Kondensataustritt
	3	Index Kühlwassereintritt
	4	Index Dampfeintritt
Parameter	\dot{m}_w	Nenndurchsatz Kühlwasser
	$t_{e,0}$	Nenntemperatur Kühlwassereintritt
	$p_{e,0}$	Nenndruck Kühlwassereintritt
	Δp_w	Nenndruckverlust Kühlwasser
	Δt_w	Nennaufwärmspanne Kühlwasser
	V_w	Volumen Kühlwasser
	l_w	Leitungslänge Kühlwasser
	\dot{m}_s	Nenndurchsatz Abdampf
	$p_{s,0}$	Nenndruck Abdampf/Kondensator
	Δp_c	Nenndruckverlust Kondensat
	V_s	Volumen Dampfraum
	l_c	Leitungslänge Kondensat

Elementargleichung des idealen Speichervolumens Kühlwasser

$$\Sigma \dot{V}_{31} = C_f \frac{dp_3}{dt} \quad (130)$$

Volumenstrombilanz am Speichervolumen Kühlwasser

$$\Sigma \dot{V}_{31} = (\dot{m}_3 - \dot{m}_1) / \rho_3 \quad (131)$$

Fluidkapazität Kühlwasser

$$C_f = \frac{V_w}{\beta} + C_w \quad (132)$$

Wandelastizität Kühlwasser

$$C_w = 0 \quad (133)$$

Fluidelastizitätsmodul Kühlwasser

$$\beta = p_3 \quad (134)$$

Elementargleichung des idealen Speichervolumens Abdampf

$$\Sigma \dot{V}_{42} = C_f \frac{dp_4}{dt} \quad (135)$$

Volumenstrombilanz am Speichervolumen Abdampf

$$\Sigma \dot{V}_{42} = (\dot{m}_4 - \dot{m}_2) / \rho_4 \quad (136)$$

Fluidkapazität Abdampf

$$C_f = \frac{V_s}{\beta} + C_w \quad (137)$$

Wandelastizität Abdampf

$$C_w = 0 \quad (138)$$

Fluidelastizitätsmodul Abdampf

$$\beta = p_4 \quad (139)$$

Elementargleichung des idealen Reibungselements Kühlwasser

$$\Delta p_{31} = R_{f,w} \cdot \dot{V}_1 \quad (140)$$

$$\dot{V}_1 = \dot{m}_1 / \rho_{31} \quad (141)$$

$$\rho_{31} = \rho \left(\frac{1}{2} (p_1 + p_3), h_3 \right) \quad (142)$$

Widerstandskenngröße Kühlwasser

$$\Delta p_{w,0} = R_{f,w} \cdot \dot{V}_{10} \quad (143)$$

$$\dot{V}_{10} = \rho_{310} \cdot m_{10} \quad (144)$$

$$\rho_{310} = \rho\left(\frac{1}{2}(p_{10} + p_{30}), h_{30}\right) \quad (145)$$

Elementargleichung des idealen Reibungselements Kondensat

$$\Delta p_{42} = R_{f,s} \cdot \dot{V}_2 \quad (146)$$

$$\dot{V}_2 = \rho_{42} \cdot m_2 \quad (147)$$

$$\rho_{42} = \rho\left(\frac{1}{2}(p_2 + p_4), h_4\right) \quad (148)$$

Widerstandskenngröße Kondensat

$$\Delta p_{c,0} = R_{f,c} \cdot \dot{V}_{20} \quad (149)$$

$$\dot{V}_{20} = m_{20} / \rho_{420} \quad (150)$$

$$\rho_{420} = \rho\left(\frac{1}{2}(p_{20} + p_{40}), h_{40}\right) \quad (151)$$

Trägheitsgleichung (Impulsbilanz) Kühlwasser

$$p_{31} = I_w \cdot \left(\frac{d\dot{V}_{31}}{dt} \right) \quad (152)$$

$$\dot{V}_{31} = \frac{\dot{m}_1}{\rho_{31}} \quad (153)$$

Trägheitskenngröße Kühlwasser

$$I_w = 2 \cdot \left(\frac{\rho}{A_w} \right) \cdot l_w \quad (154)$$

$$A_w = \frac{V_w}{l_w} \quad (155)$$

Trägheitsgleichung (Impulsbilanz) Kondensat

$$p_{42} = I_c \cdot \left(\frac{d\dot{V}_{42}}{dt} \right) \quad (156)$$

$$\dot{V}_{42} = \frac{\dot{m}_2}{\rho_{42}} \quad (157)$$

Trägheitskenngröße Kondensat

$$I_c = 2 \cdot \left(\frac{\rho}{A_c} \right) \cdot I_c \quad (158)$$

$$A_c = \frac{V_s}{I_c} \quad (159)$$

Energiebilanz

$$q_0 = \dot{m}_w \cdot (h(p_{e,0} - \Delta p_w, t_{e,0} + \Delta t_w) - h(p_{e,0}, t_{e,0})) \quad (160)$$

$$\Delta t_{s,0} = \Delta t_w = \ln \left(\frac{t_{s,0} - t_{e,0}}{t_{s,0} - t_{e,0} - \Delta t_w} \right) \quad (161)$$

$$k \cdot A = \frac{q_0}{\Delta t_{s,0}} \quad (162)$$

$$\Delta h_v = h_4 - h'(p_4) \quad (163)$$

$$\Delta t_s = \Delta h_v \cdot \frac{\dot{m}_4}{k \cdot A} \quad (164)$$

4.4.3 Entgaser

Die Komponente Entgaser (Speisewasserbehälter) dient als Massen- und Wärmespeicher, der die Kesselspeisung sicherstellen und die Speisewassertemperatur möglichst konstant halten soll.

Diese Komponente ist ein als Mischvorwärmer ausgeführter Behälter mit stofflicher und thermischer Mischung des Speisewassers mit einem Anzapfdampfstrom.

Charakteristisch für den Entgaser ist, daß die Mischung der beiden Teilströme wie in einem idealen Rührkessel erfolgt, für die Ermittlung der thermischen Parameter im Dampf- bzw. Wasserteilvolumen werden jeweils die Schnittpunkte der Siedelinie mit der oberen bzw. unteren Grenzkurve angenommen.

Vektor	1	Index Strömungsausritt Speisewasser
	2	Index Strömungseintritt Speisewasser
	3	Index Strömungseintritt Anzapfdampf
Parameter	\dot{m}_0	Nenndurchsatz gesamt
	p_{s0}	Nenndruck
	Δp_0	Nenndruckverlust Austrittsleitung
	V	Volumen gesamt
	l	Länge Austrittsleitung

Elementargleichung des idealen Speichervolumens

$$\Sigma \dot{V}_s = C_f \frac{dp_s}{dt} \quad (165)$$

Volumenstrombilanz am Speichervolumen

$$\Sigma \dot{V}_s = (\dot{m}_2 + \dot{m}_3 - \dot{m}_1) / \rho_s \quad (166)$$

Fluidkapazität

$$C_f = \frac{V}{\beta} + C_w \quad (167)$$

Wandelastizität

$$C_w = 0 \quad (168)$$

Fluidel Elastizitätsmodul

$$\beta = p_s \quad (169)$$

Elementargleichung des idealen Reibungselements

$$\Delta p_1 = R_f \cdot \dot{V}_1 \quad (170)$$

$$\dot{V}_1 = \dot{m}_1 / \rho_{s1} \quad (171)$$

$$\rho_{s1} = \rho(p_{1/2}(p_1 + p_s), h'_s) \quad (172)$$

Widerstandskenngröße

$$\Delta p_{10} = R_f \cdot \dot{V}_{10} \quad (173)$$

$$\dot{V}_{10} = \dot{m}_{10} / \rho_{s10} \quad (174)$$

$$\rho_{s10} = \rho(p_{10/2}(p_{10} + p_{s0}), h'_{s0}) \quad (175)$$

Trägheitsgleichung (Impulsbilanz)

$$p_{s1} = I \cdot \left(\frac{d\dot{V}_{s1}}{dt} \right) \quad (176)$$

$$\dot{V}_{s1} = \frac{\dot{m}_1}{\rho_{s1}} \quad (177)$$

Trägheitskenngröße

$$I = 2 \cdot \left(\frac{\rho_{s1}}{A} \right) \cdot l \quad (178)$$

$$A = \frac{V}{l} \quad (179)$$

Enthalpiebedingung

$$h_1 = h'(p_s) \quad (180)$$

4.4.4 Kühlturm

Die Komponente Kühlturm dient zur Auskopplung des Wärmestromes der Abdampfkondensation in einem Kondensator an die Atmosphäre. Dabei wird von einem Rückkühlsystem mit Naturzugkühlturm ausgegangen.

Die Wärmeauskopplung erfolgt durch Verdunstung eines Teiles des Kühlwassers in Luft bei Verteilung über Rieseleinbauten im Kühlturm.

Grundlage für die Implementierung des thermischen Lastverhaltens des Kühlturms ist eine aus dem Kühlturmkennefeld zu entnehmende Korrelation zwischen Warmwassereinspeisung und Wasserabkühlung.

Vektoren	1	Index Kühlwassereintritt
	2	Index Kühlwasseraustritt
Parameter	\dot{m}_0	Nenndurchsatz Kühlwasser
	$t_{e,0}$	Nenntemperatur Warmwassereintritt
	$p_{a,0}$	Nennumgebungsdruck
	Δp_w	Nenndruckverlust Warmwasser
	V_w	Volumen Warmwasser
	l_w	Leitungslänge Warmwasser
	Δt_a	Nennwasserabkühlung
	Δp_c	Nenndruckverlust Kaltwasser
	l_c	Leitungslänge Kaltwasser
	C	Korrelation Wasserabkühlung zu Warmwassereinspeisung

Elementargleichung des idealen Speichervolumens Warmwasser

$$\Sigma \dot{V}_{21} = C_f \frac{dp_2}{dt} \quad (181)$$

Volumenstrombilanz am Speichervolumen Warmwasser

$$\Sigma \dot{V}_{21} = (\dot{m}_2 - \dot{m}_1) / \rho_2 \quad (182)$$

Fluidkapazität Warmwasser

$$C_f = \frac{V_w}{\beta} + C_w \quad (183)$$

Wandelastizität Warmwasser

$$C_w = 0 \quad (184)$$

Fluidel Elastizitätsmodul Warmwasser

$$\beta = p_2 \quad (185)$$

Elementargleichung des idealen Reibungselements Kaltwasser

$$\Delta p_{1a} = R_{f,c} \cdot \dot{V}_1 \quad (186)$$

$$\dot{V}_1 = \dot{m}_1 / \rho_{1a} \quad (187)$$

$$\rho_{1a} = \rho^{1/2}(p_1 + p_{a,0}), h_1) \quad (188)$$

Widerstandskenngröße Kaltwasser

$$\Delta p_{1a,0} = R_{f,c} \cdot \dot{V}_{10} \quad (189)$$

$$\dot{V}_{10} = \dot{m}_0 / \rho_{1a,0} \quad (190)$$

$$\rho_{1a,0} = \rho^{1/2}(p_{10} + p_{a0}), h_{10}) \quad (191)$$

Trägheitsgleichung (Impulsbilanz) Kaltwasser

$$p_{1a} = l_c \cdot \left(\frac{d\dot{V}_{1a}}{dt} \right) \quad (192)$$

$$\dot{V}_{1a} = \frac{\dot{m}_1}{\rho_{1a}} \quad (193)$$

Trägheitskenngröße Kaltwasser

$$l_c = 2 \cdot \left(\frac{\rho}{A_c} \right) \cdot l_c \quad (194)$$

$$A_c = \frac{V_w}{l_c} \quad (195)$$

Energiebilanz

$$\Delta t_w = \dot{m}_2 \cdot C \cdot \Delta t_a \quad (196)$$

$$t_1 = t_2 - \Delta t_w \quad (197)$$

4.5 Turbomaschinen

4.5.1 Vollbeaufschlagte Stufengruppe mit Wirkungsgradkennlinie

Die Komponente Stufengruppe dient zur Simulation einer Dampfturbine bzw. einer Teilturbine ohne Anzapfung. Des Weiteren werden Fluideinspeicherung bzw. Fluidausspeicherung und Beschleunigung der Fluidmasse berücksichtigt. Charakteristisch für die Turbine ist, daß die Wellendrehzahl variabel sein kann.

Das Durchflußgesetz für die Turbine wird nach Stodola, allerdings ohne Grenzdruck, berechnet [35] [36]. Ist eine rückwärtige Durchströmung der Turbine zu erwarten, so muß eine entsprechende Erweiterung vorgenommen werden [41]. Die Wirkungsgradabhängigkeit basiert auf Volkov [38], erweitert auf Ventilationsbetrieb durch Transformation in eine direkte Enthalpieformulierung.

Vektoren	1	Index Wellenaustritt
	2	Index Strömungsaustritt
	3	Index Welleneintritt
	4	Index Strömungseintritt
Parameter	\dot{m}_0	Nenndurchsatz
	$t_{e,0}$	Nenntemperatur am Eintritt
	$p_{e,0}$	Nenndruck am Eintritt
	$p_{a,0}$	Nenndruck am Austritt
	η_0	Nennwirkungsgrad
	n_0	Nenndrehzahl
	j_t	Wellenträgheitsmoment
	V	Volumen
	l	Leitungslänge

Elementargleichung des idealen Speichervolumens

$$\Sigma \dot{V}_{42} = C_f \frac{dp_{42}}{dt} \quad (198)$$

Volumenstrombilanz am Speichervolumen

$$\Sigma \dot{V}_{42} = (\dot{m}_4 - \dot{m}_2) / \rho_4 \quad (199)$$

Fluidkapazität

$$C_f = \frac{V}{\beta} + C_w \quad (200)$$

Wandelastizität

$$C_w = 0 \quad (201)$$

Fluider Elastizitätsmodul

$$\beta = p_4 \quad (202)$$

Durchflußkegelgesetz nach Stodola

$$\frac{m_2}{m_0} = \frac{n_1}{n_0} \cdot \sqrt{\left(\frac{p_4}{p_{e,0}} \cdot \frac{v_{e,0}}{v_4} \right) \cdot \left(\frac{1 - b^2}{1 - b_0^2} \right)} \quad (203)$$

$$b = \frac{p_2}{p_4} \quad (204)$$

$$b_0 = \frac{p_{a,0}}{p_{e,0}} \quad (205)$$

Trägheitsgleichung (Impulsbilanz)

$$p_{42} = l \cdot \left(\frac{d\dot{V}_{42}}{dt} \right) \quad (206)$$

$$\dot{V}_{42} = \frac{\dot{m}_2}{\rho_{42}} \quad (207)$$

Trägheitskenngröße

$$l = 2 \cdot \left(\frac{\rho}{A} \right) \cdot l \quad (208)$$

$$A = \frac{V}{l} \quad (209)$$

Wirkungsgradabhängigkeit nach Volkov

$$h_{a, is, 0} = h(p_{a, 0}, s_{e, 0}) \quad (210)$$

$$\Delta h_{is, 0} = h_{e, 0} - h_{a, is, 0} \quad (211)$$

$$h_{2, is} = h(p_2, s_4) \quad (212)$$

$$\Delta h_{is} = h_4 - h_{2, is} \quad (213)$$

$$\eta = \eta_0 \cdot \left(1 - \left(\sqrt{\frac{\Delta h_{is, 0}}{\Delta h_{is}}} - 1 \right)^2 \cdot a \right) \quad (214)$$

$$a = 1 \quad (215)$$

Enthalpieformulierung für Ventilationsbetrieb

$$\Delta h = \eta_0 \cdot \left(h_{2, is} - \left(\sqrt{h_{a, is, 0}} - \text{sign}(h_{2, is}) \cdot \sqrt{|h_{2, is}|} \right)^2 \cdot a \right) \quad (216)$$

4.5.2 Vollbeaufschlagte Stufengruppe mit Anzapfung

Diese Komponente dient zur Simulation einer Stufengruppe mit Anzapfung. Des weiteren werden Fluideinspeicherung bzw. Fluidausspeicherung und Beschleunigung der Fluidmasse berücksichtigt.

Charakteristisch für die Stufengruppe mit Anzapfung ist, daß die Anzapfung als abgehende Rohrleitung an das Kontrollvolumen am Eintritt der Stufengruppe angebunden ist. Diese Komponente ist also zu verwenden, wenn sich als Sonderbauform die Anzapfung im Einströmbereich einer Teilturbine befindet, bzw. standardmäßig bei Anzapfungen zwischen Stufengruppen. Befindet sich eine Anzapfung oder Medienstromaufteilung im Abströmbereich einer Teilturbine, so ist die Standardkomponente Stufengruppe (Abschn. 4.5.1) mit der Standardkomponente Verzweigung (Abschn. 4.3.3) in der Anlagenverschaltung zu kombinieren.

Vektoren	1	Index Wellenaustritt
	2	Index Turbinenaustritt

	3	Index Anzapfung
	4	Index Welleneintritt
	5	Index Turbineneintritt
Parameter	\dot{m}_0	Nenndurchsatz gesamt
	$t_{e,0}$	Nenntemperatur am Eintritt
	$p_{e,0}$	Nenndruck am Eintritt
	$p_{a,0}$	Nenndruck am Austritt
	η_0	Nennwirkungsgrad
	n_0	Nenndrehzahl
	j_t	Wellenträgheitsmoment
	V	Volumen
	l	Leitungslänge
	\dot{m}_2	Nenndurchsatz Anzapfung
	Δp_2	Nenndruckverlust Anzapfungsleitung
	l_2	Leitungslänge Anzapfung

Elementargleichung des idealen Speichervolumens

$$\Sigma \dot{V}_{52} = C_f \frac{dp_{52}}{dt} \quad (217)$$

Volumenstrombilanz am Speichervolumen

$$\Sigma \dot{V}_{52} = (\dot{m}_5 - \dot{m}_2 - \dot{m}_3) / \rho_4 \quad (218)$$

Fluidkapazität

$$C_f = \frac{V}{\beta} + C_w \quad (219)$$

Wandelastizität

$$C_w = 0 \quad (220)$$

Fluidelastizitätsmodul

$$\beta = p_5 \quad (221)$$

Trägheitsgleichung (Impulsbilanz) Anzapfung

$$p_{53} = I \cdot \left(\frac{d\dot{V}_{53}}{dt} \right) \quad (222)$$

$$\dot{V}_{53} = \frac{\dot{m}_2}{\rho_{53}} \quad (223)$$

Elementargleichung des idealen Reibungselements Anzapfung

$$\Delta p_{53} = R_f \cdot \dot{V}_3 \quad (224)$$

$$\dot{V}_3 = m_3 / \rho_{53} \quad (225)$$

$$\rho_{53} = \rho(\sqrt[1]{2}(p_5 + p_3), h_5) \quad (226)$$

Widerstandskenngröße Anzapfung

$$\Delta p_0 = R_f \cdot \dot{V}_{10} \quad (227)$$

$$\dot{V}_{10} = m_{30} / \rho_{530} \quad (228)$$

$$\rho_{530} = \rho(\sqrt[1]{2}(p_{50} + p_{30}), h_{50}) \quad (229)$$

Trägheitskenngröße Anzapfung

$$I = 2 \cdot \left(\frac{\rho}{A_2} \right) \cdot l_2 \quad (230)$$

$$A_2 = \frac{V}{l_2} \quad (231)$$

Durchflußkegelgesetz nach Stodola

$$\frac{m_2}{m_0} = \frac{n_1}{n_0} \cdot \sqrt{\left(\frac{p_5}{p_{e,0}} \cdot \frac{v_{e,0}}{v_5} \right) \cdot \left(\frac{1 - b^2}{1 - b_0^2} \right)} \quad (232)$$

$$b = \frac{p_2}{p_5} \quad (233)$$

$$b_0 = \frac{p_{a,0}}{p_{e,0}} \quad (234)$$

Trägheitsgleichung (Impulsbilanz) Turbine

$$p_{52} = I \cdot \left(\frac{d\dot{V}_{52}}{dt} \right) \quad (235)$$

$$\dot{V}_{52} = \frac{\dot{m}_2}{\rho_{52}} \quad (236)$$

Trägheitskenngröße Turbine

$$I = 2 \cdot \left(\frac{\rho}{A} \right) \cdot l \quad (237)$$

$$A = \frac{V}{l} \quad (238)$$

Wirkungsgradabhängigkeit nach Volkov

$$h_{a, is, 0} = h(p_{a, 0}, s_{e, 0}) \quad (239)$$

$$\Delta h_{is, 0} = h_{e, 0} - h_{a, is, 0} \quad (240)$$

$$h_{2, is} = h(p_2, s_4) \quad (241)$$

$$\Delta h_{is} = h_5 - h_{2, is} \quad (242)$$

$$\eta = \eta_0 \cdot \left(1 - \left(\sqrt{\frac{\Delta h_{is, 0}}{\Delta h_{is}}} - 1 \right)^2 \cdot a \right) \quad (243)$$

$$a = 1 \quad (244)$$

Enthalpieformulierung für Ventilationsbetrieb

$$\Delta h = \eta_0 \cdot \left(h_{2, is} - \left(\sqrt{h_{a, is, 0}} - \text{sign}(h_{2, is}) \cdot \sqrt{|h_{2, is}|} \right)^2 \cdot a \right) \quad (245)$$

4.5.3 Einfache Pumpe

Die Komponente Pumpe dient zur Simulation einer radialen Zentrifugalpumpe (Kreiselpumpe, auch mehrstufig) ohne Anzapfung. Des Weiteren werden Fluidspeicherung bzw. Fluidausspeicherung und Beschleunigung der Fluidmasse berücksichtigt.

Charakteristisch für die Pumpe ist, daß die Wellendrehzahl variabel sein kann.

Die Förderhöhencharakteristik und der Wirkungsgradverlauf bei Abweichungen von Durchsatz und Drehzahl von den Nennparametern werden über generalisierte Parabelgesetze approximiert ([23], [29]).

Vektoren	1	Index Strömungsausritt
	2	Index Welleneintritt
	3	Index Strömungseintritt
Parameter	\dot{m}_0	Nenndurchsatz
	$t_{e,0}$	Nenntemperatur am Eintritt
	$p_{e,0}$	Nenndruck am Eintritt
	Δp_0	Nennförderhöhe (als Druckdifferenz)
	η_0	Nennwirkungsgrad
	n_0	Nennndrehzahl
	V	Volumen
	l	Leitungslänge

Elementargleichung des idealen Speichervolumens

$$\Sigma \dot{V}_{31} = C_f \frac{dp_{31}}{dt} \quad (246)$$

Volumenstrombilanz am Speichervolumen

$$\Sigma \dot{V}_{31} = (\dot{m}_3 - \dot{m}_1) / \rho_3 \quad (247)$$

Fluidkapazität

$$C_f = \frac{V}{\beta} + C_w \quad (248)$$

Wandelastizität

$$C_w = 0 \quad (249)$$

Fluider Elastizitätsmodul

$$\beta = p_3 \quad (250)$$

Durchflußgesetz

$$\dot{V}_0 = \dot{m}_0 / \rho(p_{e,0}, t_{e,0}) \quad (251)$$

$$\dot{V}_1 = \dot{V}_0 \cdot \sqrt{\left(9 \cdot \left(\frac{n_2}{n_0}\right)^2 - 8 \cdot \left(\frac{p_1 - p_3}{\Delta p_0}\right)\right)} \quad (252)$$

$$\dot{m}_1 = \dot{V}_1 \cdot \rho(p_3, h_3) \quad (253)$$

Trägheitsgleichung (Impulsbilanz)

$$p_{31} = I \cdot \left(\frac{d\dot{V}_{31}}{dt}\right) \quad (254)$$

$$\dot{V}_{31} = \frac{\dot{m}_1}{\rho_{31}} \quad (255)$$

Trägheitskenngröße

$$I = 2 \cdot \left(\frac{\rho}{A}\right) \cdot l \quad (256)$$

$$A = \frac{V}{l} \quad (257)$$

Wirkungsgradabhängigkeit

$$h_{1,is} = h(p_1, s_3) \quad (258)$$

$$\Delta h_{is} = h_{1,is} - h_3 \quad (259)$$

$$\eta' = \eta_0 - \left(\frac{m_0 - m_1}{m_0}\right)^2 \cdot \eta_0 \quad (260)$$
$$\eta = 1 - (1 - \eta') \cdot \left(\frac{n_0}{n_2}\right)^{1/10}$$

$$h_1 = h_3 + \Delta h_{is} / \eta$$

(261)

4.5.4 Pumpe mit Anzapfung

Die Komponente Pumpe dient zur Simulation einer radialen Zentrifugalpumpe (Kreiselpumpe) mit einer Anzapfung zwischen zwei aufeinanderfolgenden Stufen bzw. Stufengruppen. Des weiteren werden Fluideinspeicherung bzw. Fluidausspeicherung und Beschleunigung der Fluidmasse berücksichtigt.

Charakteristisch für die Pumpe ist, daß die Wellendrehzahl variabel sein kann. Die Nennförderhöhen werden den beiden Stufengruppen separat zugeordnet, während für den Nennwirkungsgrad ausschließlich mit einem Wirkungsgrad der Gesamtanlage gearbeitet wird, da in der Regel auch keine Einzelwirkungsgrade der Stufengruppen verfügbar sind. Die Förderhöhencharakteristik und der Wirkungsgradverlauf bei Abweichungen von Durchsatz und Drehzahl von den Nennparametern werden über generalisierte Parabelgesetze approximiert.

Vektoren	1	Index Strömungsausritt Hauptmassenstrom
	2	Index Strömungsausritt Anzapfung
	3	Index Welleneintritt
	4	Index Strömungseintritt
Parameter	\dot{m}_0	Nenndurchsatz
	$t_{e,0}$	Nenntemperatur am Eintritt
	$p_{e,0}$	Nenndruck am Eintritt
	Δp_0	Nennförderhöhe gesamt (als Druckdifferenz)
	$\dot{m}_{x,0}$	Anzapfmassenstrom
	$\Delta p_{x,0}$	Nennförderhöhe Anzapfung (als Druckdifferenz)

$\Delta p_{\text{ex},0}$	Druckdifferenz Anzapfleitung
η_0	Nennwirkungsgrad
n_0	Nenndrehzahl
V	Volumen
l	Leitungslänge

Stufengruppe 1

Elementargleichung des idealen Speichervolumens

$$\Sigma \dot{V}_{42} = C_f \frac{dp_{42}}{dt} \quad (262)$$

Volumenstrombilanz am Speichervolumen

$$\Sigma \dot{V}_{42} = (\dot{m}_4 - \dot{m}_2) / \rho_4 \quad (263)$$

Fluidkapazität

$$C_f = \frac{V}{\beta} + C_w \quad (264)$$

Wandelastizität

$$C_w = 0 \quad (265)$$

Fluider Elastizitätsmodul

$$\beta = p_4 \quad (266)$$

Durchflußgesetz

$$\dot{V}_0 = \dot{m}_0 / \rho(p_{e,0}, t_{e,0}) \quad (267)$$

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_0 \cdot \sqrt{\left(9 \cdot \left(\frac{n_3}{n_0}\right)^2 - 8 \cdot \left(\frac{p_2 - p_4}{\Delta p_0}\right)\right)} \quad (268)$$

$$\dot{m}_2 = \dot{V}_2 \cdot \rho(p_4, h_4) \quad (269)$$

Trägheitsgleichung (Impulsbilanz)

$$p_{42} = I \cdot \left(\frac{d\dot{V}_{42}}{dt} \right) \quad (270)$$

$$\dot{V}_{42} = \frac{\dot{m}_2}{\rho_{42}} \quad (271)$$

Trägheitskenngröße

$$I = 2 \cdot \left(\frac{\rho}{A} \right) \cdot l \quad (272)$$

$$A = \frac{V}{l} \quad (273)$$

Wirkungsgradabhängigkeit

$$h_{2, is} = h(p_2, s_4) \quad (274)$$

$$\Delta h_{is} = h_{2, is} - h_4 \quad (275)$$

$$\eta' = \eta_0 - \left(\frac{m_0 - m_2}{m_0} \right)^2 \cdot \eta_0 \quad (276)$$

$$\eta = 1 - (1 - \eta') \cdot \left(\frac{n_0}{n_3} \right)^{1/10}$$

$$h_2 = h_4 + \Delta h_{is} / \eta \quad (277)$$

Stufengruppe 2

Elementargleichung des idealen Speichervolumens

$$\Sigma \dot{V}_{41} = C_f \frac{dp_{41}}{dt} \quad (278)$$

Volumenstrombilanz am Speichervolumen

$$\Sigma \dot{V}_{41} = (\dot{m}_4 - \dot{m}_1) / \rho_4 \quad (279)$$

Fluidkapazität

$$C_f = \frac{V}{\beta} + C_w \quad (280)$$

Wandelastizität

$$C_w = 0 \quad (281)$$

Fluider Elastizitätsmodul

$$\beta = p_4 \quad (282)$$

Durchflußgesetz

$$\dot{V}_0 = \dot{m}_0 / \rho(p_{e,0}, t_{e,0}) \quad (283)$$

$$\dot{V}_1 = \dot{V}_0 \cdot \sqrt{\left(9 \cdot \left(\frac{n_3}{n_0}\right)^2 - 8 \cdot \left(\frac{p_1 - p_4}{\Delta p_0}\right)\right)} \quad (284)$$

$$\dot{m}_1 = \dot{V}_1 \cdot \rho(p_4, h_4) \quad (285)$$

Trägheitsgleichung (Impulsbilanz)

$$p_{41} = I \cdot \left(\frac{d\dot{V}_{41}}{dt}\right) \quad (286)$$

$$\dot{V}_{41} = \frac{\dot{m}_1}{\rho_{41}} \quad (287)$$

Trägheitskenngröße

$$I = 2 \cdot \left(\frac{\rho}{A}\right) \cdot l \quad (288)$$

$$A = \frac{V}{l} \quad (289)$$

Wirkungsgradabhängigkeit

$$h_{1,ls} = h(p_1, s_4) \quad (290)$$

$$\Delta h_{ls} = h_{1,ls} - h_4 \quad (291)$$

$$\eta' = \eta_0 - \left(\frac{m_0 - m_1}{m_0}\right)^2 \cdot \eta_0 \quad (292)$$

$$\eta = 1 - (1 - \eta') \cdot \left(\frac{n_0}{n_3}\right)^{1/10}$$

$$h_1 = h_4 + \Delta h_{is} / \eta \quad (293)$$

4.5.5 Lüfter und Saugzug

Das Modell für Lüfter und Saugzüge ist abgeleitet von einem verallgemeinerten Kompressormodell, welches auf die entsprechend kleineren Druckverhältnisse angewendet wird. Die Parametrierung erfolgt über die Auslegungs- bzw. Referenzwerte für Gaskonstante und Isentropenexponent R und κ der Luft bzw. des Rauchgases, des Wirkungsgrades η , des Massendurchsatzes G , der Drehzahl N und des Wellenträgheitsmomentes J .

Vektoren	1	Index Strömungsausritt
	2	Index Wellenende
	3	Index Strömungseintritt
	4	Index Wellenanfang
Parameter	\dot{m}_0	Nenndurchsatz gesamt
	$p_{e,0}$	Nenndruck am Eintritt
	$p_{a,0}$	Nenndruck am Austritt
	$t_{e,0}$	Nenntemperatur am Eintritt
	R_0	Nenn-Gaskonstante
	κ_0	Nenn-Polytropenexponent
	$c_{p,0}$	spezifische Wärmekapazität
	n_0	Nenn-Drehgeschwindigkeit der Welle
	η_0	Nenn-Wirkungsgrad
	J	Nenn-Trägheitsmoment
	d_{ein}	Düsen-Durchmesser am Eintritt

d_{Welle}	Wellendurchmesser am Eintritt
a	Verhältnis von Eintritts- zur Austrittsfläche

Da die Temperatur am Eintritt nicht explizit über den entsprechenden Vektor übermittelt wird, ist sie jeweils als Umkehrfunktion aus Druck und Enthalpie zu bestimmen.

Im ersten Schritt werden eine korrigierte Drehzahl N_{corr} und deren auf die Auslegung bezogener Wert N_{map} bestimmt:

$$N_{\text{corr}} = \frac{N}{\sqrt{\frac{T_{\text{in}}}{T_{\text{ref}}} \cdot \frac{R}{R_{\text{ref}}} \cdot \frac{\kappa}{\kappa_{\text{ref}}}}} \quad (294)$$

$$N_{\text{map}} = \frac{N_{\text{corr}}}{N_{\text{ref}}} \quad (295)$$

Danach erfolgt die Bestimmung entsprechender korrigierter und bezogener Werte für den Massendurchsatz G_{corr} und G_{ratio}

$$G_{\text{corr}} = G_{\text{in}} \cdot \frac{p_{\text{ref}}}{p_{\text{in}}} \cdot \sqrt{\frac{T_{\text{in}}}{T_{\text{ref}}} \cdot \frac{R}{R_{\text{ref}}} \cdot \frac{\kappa}{\kappa_{\text{ref}}}} \quad (296)$$

$$G_{\text{ratio}} = \frac{G_{\text{corr}}}{G_{\text{ref}}} \quad (297)$$

Das zugehörige Druckverhältnis P_{ratio} wird aus einer Interpolationstabelle für N_{map} und G_{ratio} gefunden. Gleichfalls ist eine Interpolationstabelle für den Zusammenhang zwischen bezogenem Wirkungsgrad η_{map} und den entsprechenden Werten für Druck P_{ratio} und Massendurchsatz G_{ratio} zu hinterlegen.

Danach wird der aktuelle Wirkungsgrad aus Referenzwert und bezogenem Wert bestimmt:

$$\eta = \eta_{\text{ref}} \cdot \eta_{\text{map}}$$

Der neue Eintrittsdruck, welcher für den stromaufwärts liegenden Block bereitgestellt wird, ergibt sich aus dem Austrittsdruck und dem aktuellen Druckverhältnis:

$$p_{in} = \frac{p_{out}}{P_{ratio}}$$

Für die abschließende Berechnung der Austrittsenthalpie gilt die Gleichung einer Polytrope:

$$h_{out} = h_{in} + \frac{\frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot R \cdot T_{in} \cdot \left(P_{ratio}^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} - 1 \right)}{\eta} \quad (298)$$

Lüfter und Saugzüge sind Komponenten mit variabler Drehzahl, d.h. diese ist für jeden Zeitschritt über das Verhältnis von Drehmoment und Trägheitsmoment zu aktualisieren. Dabei ist zu berücksichtigen, das sich auf einer Welle mehrere Komponenten befinden können, deren Betriebsverhalten z.B. für Lüfter und Antrieb separat zu modellieren ist. Deshalb sind Drehmoment und Trägheitsmoment entlang der Welle zu summieren:

$$\text{Drehmoment:} \quad M_{in} = \frac{G_{in} \cdot (h_{out} - h_{in})}{2 \cdot \pi \cdot N} + M_{out} \quad (299)$$

$$\text{Trägheitsmoment:} \quad J_{in} = J + J_{out} \quad (300)$$

Dann kann die Änderung der Drehzahl über die Zeit durch folgende Differentialgleichung beschrieben werden:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\sum M}{2 \cdot \pi \cdot \sum J} \quad (301)$$

Dabei sind für die Momentensummierung die Anfangswerte an einem Wellenende für Drehmoment und Trägheitsmoment gleich Null zu setzen. Die Berechnung der neuen Wellendrehzahl erfolgt dann nach vollständiger Aufsummierung am anderen Wellenende. D.h. in Analogie zu Fluidvektoren mit stromaufwärtiger Aktualisierung von Druck und stromabwärtiger Aktualisierung vom Massen- und Enthalpiefluß sind wellen"abwärts" die Momente und wel-

len”aufwärts” die Drehzahl zu den Wellen”vektoren” und zur BCT zu aktualisieren.

4.6 Dampferzeuger

4.6.1 Ein-Phasen-Heizfläche

Die Komponente „1-Phasen-Heizfläche“ dient zur Übertragung von Wärmeströmen zwischen zwei Medien. Die Zuordnung der Medien zur „kalten“ bzw. „heißen“ Strömungsseite (Luft, Wasser, Dampf ...) erfolgt dabei während der Initialisierungsphase der Simulation entsprechend der Zuordnung der Medienkennzahlen in den Zuströmungen an den Systemgrenzen. Vorzugsweise kommt diese Komponente für die Simulation von rauchgasbeheizten Überhitzern für Dampf oder Economisern für Wasser zum Einsatz.

Die Berechnung der strömenden Medien erfolgt analog der Komponente Rohrleitung unter Berücksichtigung der Fluidein- bzw. -ausspeicherung, Fluidreibung und Beschleunigung der Fluidmasse sowie der Ein- und Auskopplung von Wärmeflüssen.

Die Bestimmung der aktuellen Wärmeströme erfolgt nach der NTU-Methodik (NTU = „Number of Thermal Units“).

Vektoren	1	Index Strömungsausritt Kühlmedium
	2	Index Strömungsausritt Heizmedium
	3	Index Strömungseintritt Kühlmedium
	4	Index Strömungseintritt Heizmedium
Parameter	\dot{m}_w	Nenndurchsatz Kühlmedium
	$t_{e,0}$	Nenntemperatur am Eintritt Kühlmedium
	$p_{e,0}$	Nenndruck am Eintritt Kühlmedium
	Δp_w	Nenndruckverlust Kühlmedium
	Δt_w	Nennaufwärmspanne

V_w	Volumen Kühlmedium
l_w	Leitungslänge Kühlmedium
\dot{m}_s	Nenndurchsatz Heizmedium
$t_{s,0}$	Nenntemperatur am Eintritt Heizmedium
$p_{s,0}$	Nenndruck Heizmedium
Δp_s	Nenndruckverlust Heizmedium
V_s	Volumen Heizmedium
l_s	Leitungslänge Heizmedium

Elementargleichung des idealen Speichervolumens Kühlmedium

$$\Sigma \dot{V}_{31} = C_f \frac{dp_3}{dt} \quad (302)$$

Volumenstrombilanz am Speichervolumen Kühlmedium

$$\Sigma \dot{V}_{31} = (\dot{m}_3 - \dot{m}_1) / \rho_3 \quad (303)$$

Fluidkapazität Kühlmedium

$$C_f = \frac{V_w}{\beta} + C_w \quad (304)$$

Wandelastizität Kühlmedium

$$C_w = 0 \quad (305)$$

Fluider Elastizitätsmodul Kühlmedium

$$\beta = p_3 \quad (306)$$

Elementargleichung des idealen Speichervolumens Heizmedium

$$\Sigma \dot{V}_{42} = C_f \frac{dp_4}{dt} \quad (307)$$

Volumenstrombilanz am Speichervolumen Heizmedium

$$\Sigma \dot{V}_{42} = (\dot{m}_4 - \dot{m}_2) / \rho_4 \quad (308)$$

Fluidkapazität Heizmedium

$$C_f = \frac{V_s}{\beta} + C_w \quad (309)$$

Wandelastizität Heizmedium

$$C_w = 0 \quad (310)$$

Fluider Elastizitätsmodul Heizmedium

$$\beta = p_4 \quad (311)$$

Elementargleichung des idealen Reibungselements Kühlmedium

$$\Delta p_{31} = R_{f,w} \cdot \dot{V}_1 \quad (312)$$

$$\dot{V}_1 = m_1 / \rho_{31} \quad (313)$$

$$\rho_{31} = \rho(\frac{1}{2}(p_1 + p_3), h_3) \quad (314)$$

Widerstandskenngröße Kühlmedium

$$\Delta p_{w,0} = R_{f,w} \cdot \dot{V}_{10} \quad (315)$$

$$\dot{V}_{10} = m_{10} / \rho_{310} \quad (316)$$

$$\rho_{310} = \rho(\frac{1}{2}(p_{10} + p_{30}), h_{30}) \quad (317)$$

Elementargleichung des idealen Reibungselements Heizmedium

$$\Delta p_{42} = R_{f,s} \cdot \dot{V}_2 \quad (318)$$

$$\dot{V}_2 = m_2 / \rho_{42} \quad (319)$$

$$\rho_{42} = \rho(\frac{1}{2}(p_2 + p_4), h_4) \quad (320)$$

Widerstandskenngröße Heizmedium

$$\Delta p_{s,0} = R_{f,s} \cdot \dot{V}_{20} \quad (321)$$

$$\dot{V}_{20} = m_{20} / \rho_{420} \quad (322)$$

$$\rho_{420} = \rho(\frac{1}{2}(p_{20} + p_{40}), h_{40}) \quad (323)$$

Trägheitsgleichung (Impulsbilanz) Kühlmedium

$$p_{31} = I_s \cdot \left(\frac{d\dot{V}_{31}}{dt} \right) \quad (324)$$

$$\dot{V}_{31} = \frac{\dot{m}_1}{\rho_{31}} \quad (325)$$

Trägheitskenngröße Kühlmedium

$$I_s = 2 \cdot \left(\frac{\rho_{31}}{A_s} \right) \cdot I_s \quad (326)$$

$$A_s = \frac{V_s}{I_s} \quad (327)$$

Trägheitsgleichung (Impulsbilanz) Heizmedium

$$p_{42} = I_w \cdot \left(\frac{d\dot{V}_{42}}{dt} \right) \quad (328)$$

$$\dot{V}_{42} = \frac{\dot{m}_2}{\rho_{42}} \quad (329)$$

Trägheitskenngröße Heizmedium

$$I_w = 2 \cdot \left(\frac{\rho_{42}}{A_w} \right) \cdot I_w \quad (330)$$

$$A_w = \frac{V_w}{I_w} \quad (331)$$

Energiebilanz

$$q_0 = \dot{m}_w \cdot (h(p_{e,0} - \Delta p_w, t_{e,0} + \Delta t_w) - h(p_{e,0}, t_{e,0})) \quad (332)$$

$$\Delta t_{s,0} = \Delta t_w / \log \left(\frac{t_{s,0} - t_{e,0}}{t_{s,0} - t_{e,0} - \Delta t_w} \right) \quad (333)$$

$$k \cdot A = \frac{q_0}{\Delta t_{s,0}} \quad (334)$$

$$\Delta h_v = h_4 - h'(p_4) \quad (335)$$

$$\Delta t_s = \Delta h_v \cdot \frac{\dot{m}_4}{k \cdot A} \quad (336)$$

4.6.2 Verdampfer

Die Komponente Verdampfer dient zur Übertragung von Wärmeströmen zwischen zwei Medien. Die Zuordnung der Medien zur „kalten“ bzw. „heißen“ Strömungsseite (Luft, Wasser, Dampf ...) erfolgt dabei während der Initialisierungsphase der Simulation entsprechend der Zuordnung der Medienkennzahlen in den Zuströmungen an den Systemgrenzen, wobei vorzugsweise die heiße Strömungsseite rauchgasbeaufschlagt und die kalte Seite wasserbeaufschlagt sein sollte. Zusätzlich zur bekannten Komponente 1-Phasen-Wärmeübertrager erfolgt außerdem die Ermittlung möglicher Phasenwechsel die dem entsprechende Verwendung angepaßter Wärmeübergangsgesetze.

Die Berechnung der strömenden Medien erfolgt analog der Komponente Rohrleitung unter Berücksichtigung der Fluideinspeicherung bzw. Fluidausspeicherung, Fluidreibung und Beschleunigung der Fluidmasse sowie der Ein- und Auskopplung von Wärmeflüssen.

Vektoren	1	Index Strömungsausstritt Rauchgas
	2	Index Strömungsausstritt Dampf
	3	Index Strömungseintritt Rauchgas
	4	Index Strömungseintritt Wasser
Parameter	\dot{m}_w	Nenndurchsatz Wasser
	$t_{w,0}$	Nenntemperatur Eintritt Wasser
	$p_{w,0}$	Nenndruck Eintritt Wasser
	Δp_w	Nenndruckverlust Wasser
	V_w	Volumen Wasser/Dampf

l_w	Leitungslänge Wasser/Dampf
\dot{m}_g	Nenndurchsatz Rauchgas
$t_{g,0}$	Nenntemperatur Eintritt Rauchgas
$p_{g,0}$	Nenndruck Rauchgas
Δp_g	Nenndruckverlust Rauchgas
Δt_g	Nennabkühlspanne
V_g	Volumen Rauchgas
l_g	Leitungslänge Heizmedium

Elementargleichung des idealen Speichervolumens Kühlmedium (Wasser/Dampf)

$$\Sigma \dot{V}_{42} = C_f \frac{dp_4}{dt} \quad (337)$$

Volumenstrombilanz am Speichervolumen Kühlmedium (Wasser/Dampf)

$$\Sigma \dot{V}_{42} = (\dot{m}_4 - \dot{m}_2) / \rho_4 \quad (338)$$

Fluidkapazität Kühlmedium (Wasser/Dampf)

$$C_f = \frac{V_w}{\beta} + C_w \quad (339)$$

Wandelastizität Kühlmedium (Wasser/Dampf)

$$C_w = 0 \quad (340)$$

Fluider Elastizitätsmodul Kühlmedium (Wasser/Dampf)

$$\beta = p_4 \quad (341)$$

Elementargleichung des idealen Speichervolumens Heizmedium Rauchgas

$$\Sigma \dot{V}_{31} = C_f \frac{dp_3}{dt} \quad (342)$$

Volumenstrombilanz am Speichervolumen Heizmedium Rauchgas

$$\Sigma \dot{V}_{31} = (\dot{m}_3 - \dot{m}_1) / \rho_3 \quad (343)$$

Fluidkapazität Heizmedium Rauchgas

$$C_f = \frac{V_g}{\beta} + C_w \quad (344)$$

Wandelastizität Heizmedium Rauchgas

$$C_w = 0 \quad (345)$$

Fluider Elastizitätsmodul Heizmedium Rauchgas

$$\beta = p_3 \quad (346)$$

Elementargleichung des idealen Reibungselements Kühlmedium (Wasser/Dampf)

$$\Delta p_{42} = R_{f,w} \cdot \dot{V}_2 \quad (347)$$

$$\dot{V}_2 = \dot{m}_2 / \rho_{42} \quad (348)$$

$$\rho_{42} = \rho^{(1/2(p_2 + p_4), h_4)} \quad (349)$$

Widerstandskenngröße Kühlmedium (Wasser/Dampf)

$$\Delta p_{w,0} = R_{f,w} \cdot \dot{V}_{20} \quad (350)$$

$$\dot{V}_{20} = \dot{m}_{20} / \rho_{420} \quad (351)$$

$$\rho_{420} = \rho^{(1/2(p_{20} + p_{40}), h_{40})} \quad (352)$$

Elementargleichung des idealen Reibungselements Heizmedium Rauchgas

$$\Delta p_{31} = R_{f,g} \cdot \dot{V}_1 \quad (353)$$

$$\dot{V}_1 = \dot{m}_1 / \rho_{31} \quad (354)$$

$$\rho_{31} = \rho^{(1/2(p_1 + p_3), h_3)} \quad (355)$$

Widerstandskenngröße Heizmedium Rauchgas

$$\Delta p_{g,0} = R_{f,g} \cdot \dot{V}_{10} \quad (356)$$

$$\dot{V}_{10} = \dot{m}_{10} / \rho_{310} \quad (357)$$

$$\rho_{310} = \rho(p_{10} + p_{30}, h_{30}) \quad (358)$$

Trägheitsgleichung (Impulsbilanz) Kühlmedium (Wasser/Dampf)

$$p_{42} = I_w \cdot \left(\frac{d\dot{V}_{42}}{dt} \right) \quad (359)$$

$$\dot{V}_{42} = \frac{\dot{m}_2}{\rho_{42}} \quad (360)$$

Trägheitskenngröße Kühlmedium (Wasser/Dampf)

$$I_w = 2 \cdot \left(\frac{\rho}{A_w} \right) \cdot I_w \quad (361)$$

$$A_w = \frac{V_w}{I_w} \quad (362)$$

Trägheitsgleichung (Impulsbilanz) Heizmedium Rauchgas

$$p_{31} = I_g \cdot \left(\frac{d\dot{V}_{31}}{dt} \right) \quad (363)$$

$$\dot{V}_{31} = \frac{\dot{m}_1}{\rho_{31}} \quad (364)$$

Trägheitskenngröße Heizmedium Rauchgas

$$I_g = 2 \cdot \left(\frac{\rho}{A_g} \right) \cdot I_g \quad (365)$$

$$A_g = \frac{V_g}{I_g} \quad (366)$$

Energiebilanz

$$q_0 = \dot{m}_g \cdot (h(p_{g,0}, t_{g,0}) - h(p_{g,0} - \Delta p_g, t_{g,0} - \Delta t_{g,0})) \quad (367)$$

$$q_0 = \dot{m}_w \cdot (h(p_{w,0} - \Delta p_w, t_{2,0}) - h(p_{w,0}, t_{w,0})) \quad (368)$$

$$\Delta t_{m,0} = \frac{(t_{g,0} - t_{w,0}) - (t_{g,0} - \Delta t_w - t_{2,0})}{\ln((t_{g,0} - t_{w,0}) / (t_{g,0} - \Delta t_w - t_{2,0}))} \quad (369)$$

$$k \cdot A = \frac{q_0}{\Delta t_{m,0}} \quad (370)$$

4.6.3 Wasserabscheider

Die Komponente Abscheider dient zur Aufteilung eines Naßdampfeintrittsfluidstromes in einen Sattdampfaustrittsfluidstrom und einen Sattwasseraustrittsfluidstrom. Dabei basiert die Komponente Abscheider in ihren Teilmodellen auf der Komponente Rohrleitung (unter Berücksichtigung der Fluideinspeicherung bzw. Fluidausspeicherung, Fluidreibung und Beschleunigung der Fluidmasse).

Die Ein- oder Auskopplung von Wärme-flüssen ist nicht vorgesehen, es kann auch kein Temperaturabfall vorgegeben werden.

Vektoren	1	Index Strömungsaustritt Sattdampf
	2	Index Strömungsaustritt Sattwasser
	3	Index Strömungseintritt
Parameter	\dot{m}_0	Nenndurchsatz gesamt
	$x_{e,0}$	Nenndampfgehalt am Eintritt
	η_0	Wasserabscheidereffektivität
	$p_{e,0}$	Nenndruck am Eintritt
	Δp_{10}	Nenndruckverlust Teilstrom Sattdampf
	Δp_{20}	Nenndruckverlust Teilstrom Sattwasser
	V	Volumen
	l_1	Leitungslänge Teilstrom Sattdampf
	l_2	Leitungslänge Teilstrom Sattwasser

Elementargleichung des idealen Speichervolumens

$$\Sigma \dot{V}_3 = C_f \frac{dp_3}{dt} \quad (371)$$

Volumenstrombilanz am Speichervolumen

$$\Sigma \dot{V}_3 = (\dot{m}_3 - \dot{m}_1 - \dot{m}_2) / \rho_3 \quad (372)$$

Fluidkapazität

$$C_f = \frac{V}{\beta} + C_w \quad (373)$$

Wandelastizität

$$C_w = 0 \quad (374)$$

Fluidel Elastizitätsmodul

$$\beta = p_3 \quad (375)$$

Elementargleichung des idealen Reibungselements

$$\Delta p_{31} = R_f \cdot \dot{V}_1 \quad (376)$$

$$\dot{V}_1 = \dot{m}_1 / \rho_{31} \quad (377)$$

$$\rho_{31} = \rho(\frac{1}{2}(p_1 + p_3), h_3) \quad (378)$$

$$\Delta p_{32} = R_f \cdot \dot{V}_2 \quad (379)$$

$$\dot{V}_2 = \dot{m}_2 / \rho_{32} \quad (380)$$

$$\rho_{32} = \rho(\frac{1}{2}(p_3 + p_2), h_3) \quad (381)$$

Widerstandskenngröße

$$\Delta p_{10} = R_f \cdot \dot{V}_{10} \quad (382)$$

$$\dot{V}_{10} = \dot{m}_{10} / \rho_{310} \quad (383)$$

$$\dot{m}_{10} = \dot{m}_0 - \dot{m}_{20} \quad (384)$$

$$\rho_{310} = \rho(\frac{1}{2}(\mathbf{p}_{10} + \mathbf{p}_{30}), \mathbf{h}_{30}) \quad (385)$$

$$\Delta \mathbf{p}_{20} = \mathbf{R}_f \cdot \dot{\mathbf{V}}_{20} \quad (386)$$

$$\dot{\mathbf{V}}_{20} = \dot{\mathbf{m}}_{20} / \rho_{320} \quad (387)$$

$$\dot{\mathbf{m}}_{20} = \dot{\mathbf{m}}_0 \cdot (1 - \mathbf{x}_{e0}) \cdot \eta_0 \quad (388)$$

$$\rho_{320} = \rho(\frac{1}{2}(\mathbf{p}_{30} + \mathbf{p}_{20}), \mathbf{h}_{30}) \quad (389)$$

Trägheitsgleichung (Impulsbilanz)

$$\mathbf{p}_{31} = \mathbf{I}_1 \cdot \left(\frac{d\dot{\mathbf{V}}_{31}}{dt} \right) \quad (390)$$

$$\dot{\mathbf{V}}_{31} = \frac{\dot{\mathbf{m}}_1}{\rho_{31}} \quad (391)$$

$$\mathbf{p}_{32} = \mathbf{I}_2 \cdot \left(\frac{d\dot{\mathbf{V}}_{32}}{dt} \right) \quad (392)$$

$$\dot{\mathbf{V}}_{32} = \frac{\dot{\mathbf{m}}_2}{\rho_{32}} \quad (393)$$

Trägheitskenngröße

$$\mathbf{I}_1 = 2 \cdot \left(\frac{\rho_{31}}{\mathbf{A}_1} \right) \cdot \mathbf{I}_1 \quad (394)$$

$$\mathbf{A}_1 = \frac{\mathbf{V}}{\mathbf{I}_1} \quad (395)$$

$$\mathbf{I}_2 = 2 \cdot \left(\frac{\rho_{32}}{\mathbf{A}_2} \right) \cdot \mathbf{I}_2 \quad (396)$$

$$\mathbf{A}_2 = \frac{\mathbf{V}}{\mathbf{I}_2} \quad (397)$$

Enthalpiebedingung

$$\mathbf{h}_1 = \mathbf{h}_3 \quad (398)$$

$$\mathbf{h}_2 = \mathbf{h}_3 \quad (399)$$

4.6.4 Einspritzung

Die Komponente Einspritzung dient zur stofflichen und thermischen Mischung eines Dampfhaupteintrittsstromes mit einem Wassernebineintrittsstrom. Dabei basiert die Komponente Einspritzung in ihren Teilmodellen auf der Komponente Rohrleitung (unter Berücksichtigung der Fluideinspeicherung bzw. Fluidausspeicherung, Fluidreibung und Beschleunigung der Fluidmasse).

Charakteristisch für die Zusammenführung ist, daß die Mischung der beiden Teilströme wie in einem idealen Rührkessel erfolgt.

Die Ein- oder Auskopplung von Wärme-flüssen ist nicht vorgesehen, es kann auch kein Temperaturabfall vorgegeben werden.

Vektoren	1	Index Strömungsaus-tritt Gemisch
	2	Index Strömungsein-tritt Dampf
	3	Index Strömungsein-tritt Wasser
Parameter	\dot{m}_0	Nenndurchsatz gesamt
	$t_{e,0}$	Nennmischtemperatur
	$p_{e,0}$	Nenn-druck am Eintritt
	Δp_0	Nenn-druckverlust
	V	Volumen
	l	Leitungslänge

Elementargleichung des idealen Speichervolumens

$$\Sigma \dot{V}_{23} = C_f \frac{dp_{23}}{dt} \quad (400)$$

Volumenstrombilanz am Speichervolumen

$$\Sigma \dot{V}_{23} = (\dot{m}_2 + \dot{m}_3 - \dot{m}_1) / \rho_{23} \quad (401)$$

Fluidkapazität

$$C_f = \frac{V}{\beta} + C_w \quad (402)$$

Wandelastizität

$$C_w = 0 \quad (403)$$

Fluidel Elastizitätsmodul

$$\beta = p_{23} \quad (404)$$

Elementargleichung des idealen Reibungselements

$$\Delta p_{21} = R_f \cdot \dot{V}_1 \quad (405)$$

$$\dot{V}_1 = \dot{m}_1 / \rho_{21} \quad (406)$$

$$\rho_{21} = \rho(\frac{1}{2}(p_1 + p_2), h_2) \quad (407)$$

Widerstandskenngröße

$$\Delta p_{210} = R_f \cdot \dot{V}_{210} \quad (408)$$

$$\dot{V}_{210} = \dot{m}_{10} / \rho_{210} \quad (409)$$

$$\rho_{210} = \rho(\frac{1}{2}(p_{10} + p_{20}), h_{20}) \quad (410)$$

Trägheitsgleichung (Impulsbilanz)

$$p_{21} = I \cdot \left(\frac{d\dot{V}_{21}}{dt} \right) \quad (411)$$

$$\dot{V}_{21} = \frac{\dot{m}_1}{\rho_{21}} \quad (412)$$

Trägheitskenngröße

$$I = 2 \cdot \left(\frac{\rho_{21}}{A} \right) \cdot l \quad (413)$$

$$A = \frac{V}{l} \quad (414)$$

Mischenthalpie

$$h_1 = \frac{(h_2 \cdot \dot{m}_2 + h_3 \cdot \dot{m}_3)}{\dot{m}_{23}} \quad (415)$$

$$\dot{m}_{23} = \dot{m}_2 + \dot{m}_3 \quad (416)$$

4.6.5 Brenner / Brennkammer

Das Modell der Brennkammer benötigt als Eintrittsströme 2 Hauptvektoren. Der erste Vektor besteht aus 3 Subvektoren mit den Daten eines transportierenden Gasstromes (Mischung aus Luft und rezirkulierendem Rauchgasstrom), des im rezirkulierenden Rauchgasstrom mitgeführten Aschestromes sowie des Brennstoffstromes. Der zweite Hauptvektor liefert die Verbrennungsluft.

Die 2 Ausgangshauptvektoren beschreiben den Rauchgasstrom mit Trockenascheaustrag (gesplittet darstellbar als 2 Subvektoren) und den Naßascheaustrag.

Die chemische Umsetzung des Brennstoffs wird berechnet. Dabei besteht die Möglichkeit, eine stöchiometrische oder eine überstöchiometrische Verbrennung zu realisieren. Aus der bei der Verbrennung freigesetzten Wärmemenge wird die Verbrennungstemperatur, daß heißt die Temperatur des Rauchgases nach der Brennkammer, ermittelt.

Vektoren	11	Index Strömungsausritt Gas (Rauchgas)
	12	Index Strömungsausritt Asche (Trockenasche)
	2	Index Strömungsausritt Asche (Naßasche)
	31	Index Strömungseintritt Gas
	32	Index Strömungseintritt Asche
	33	Index Strömungseintritt Brennstoff
	4	Index Strömungseintritt Luft

Parameter	\dot{m}_0	Nenndurchsatz gesamt
	$t_{e,0}$	Nenntemperatur am Eintritt
	$p_{e,0}$	Nenndruck am Eintritt
	Δp_0	Nenndruckverlust
	\dot{Q}_v	Wärmeverluste
	x_{wet}	Anteil der Naßasche

Brennstoffdaten

c, h, s, o, n, w, a	Brennstoffzusammensetzung
H_U	Heizwert

Elementargleichung des idealen Speichervolumens

$$\Sigma \dot{V}_{23} = C_f \frac{dp_{23}}{dt} \quad (417)$$

Volumenstrombilanz am Speichervolumen

$$\Sigma \dot{V}_{23} = (\dot{m}_2 + \dot{m}_3 - \dot{m}_1) / \rho_{23} \quad (418)$$

Fluidkapazität

$$C_f = \frac{V}{\beta} + C_w \quad (419)$$

Wandelastizität

$$C_w = 0 \quad (420)$$

Fluider Elastizitätsmodul

$$\beta = p_{23} \quad (421)$$

Elementargleichung des idealen Reibungselements

$$\Delta p_{21} = R_f \cdot \dot{V}_1 \quad (422)$$

$$\dot{V}_1 = \dot{m}_1 / \rho_{21} \quad (423)$$

$$\rho_{21} = \rho(\sqrt[1]{2}(\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2), h_2) \quad (424)$$

Widerstandskenngröße

$$\Delta p_{210} = R_f \cdot \dot{V}_{210} \quad (425)$$

$$\dot{V}_{210} = \dot{m}_{10} / \rho_{210} \quad (426)$$

$$\rho_{210} = \rho(\sqrt[1]{2}(\mathbf{p}_{10} + \mathbf{p}_{20}), h_{20}) \quad (427)$$

Trägheitsgleichung (Impulsbilanz)

$$\mathbf{p}_{21} = I \cdot \left(\frac{d\dot{V}_{21}}{dt} \right) \quad (428)$$

$$\dot{V}_{21} = \frac{\dot{m}_1}{\rho_{21}} \quad (429)$$

Trägheitskenngröße

$$I = 2 \cdot \left(\frac{\rho_{21}}{A} \right) \cdot l \quad (430)$$

$$A = \frac{V}{l} \quad (431)$$

Mischenthalpie

$$h_1 = \frac{(h_2 \cdot \dot{m}_2 + h_3 \cdot \dot{m}_3)}{\dot{m}_{23}} \quad (432)$$

$$\dot{m}_{23} = \dot{m}_2 + \dot{m}_3 \quad (433)$$

4.7 Randbedingungen

4.7.1 Randbedingungen Zuströmung

Die Komponente Zuströmung dient zur Definition einer Massenstrombedingung für einen Fluideintritt an einer Systemgrenze.

Charakteristisch für die Zuströmung ist, daß das „Kontrollvolumen“ außerhalb der Systemgrenze als unendlich groß angenommen wird. Außerdem dient diese Komponente der Definition der Medienart (z.B. Wasser/Wasserdampf, Luft u.a.) für das einströmende Fluid.

Zur Simulation eines veränderlichen Druckes im Kontrollvolumen kann für den Zeitpunkt des Simulationsstartes eine Sprungantwort des Druckes mit einem Zielwert und einer Zeitkonstanten parametrisiert werden.

Vektor	1	Index Strömungsausstritt
Parameter	f_{id}	Medienkennzahl
	\dot{m}_0	Nenndurchsatz
	$t_{e,0}$	Nenntemperatur am Eintritt
	$p_{e,0}$	Nenndruck am Eintritt
	Δp_0	Nenndruckverlust
	$p_{e,1}$	Zielwert für Druckänderung
	T_{63}	Zielkonstante für Druckänderung

Druckbedingung an der Systemgrenze

$$p_0 = p_{e,0} \quad \text{für } t = 0 \quad (434)$$

$$p_0 = p_{e,1} - (p_{e,1} - p_{e,0}) \cdot \exp\left(-\frac{t}{T_{63}}\right) \quad \text{für } t > 0 \quad (435)$$

Elementargleichung des idealen Reibungselements

$$\Delta p_1 = R_f \cdot \dot{V}_1 \quad (436)$$

$$\dot{V}_1 = \dot{m}_1 / \rho_1 \quad (437)$$

$$\rho_1 = \rho^{(1/2)(p_1 + p_0), h_0)} \quad (438)$$

Widerstandskenngröße

$$\Delta p_0 = R_f \cdot \dot{V}_{10} \quad (439)$$

$$\dot{V}_{10} = \dot{m}_{10} / \rho_0 \quad (440)$$

$$\rho_0 = \rho\left(\sqrt[1/2]{(p_{10} + p_{e,0})}, h_0\right) \quad (441)$$

Enthalpiebedingung

$$h_1 = h_0 \quad (442)$$

4.7.2 Randbedingungen Abströmung

Die Komponente Abströmung dient zur Definition einer Druckbedingung für eine Fluidabströmung an einer Systemgrenze.

Charakteristisch für die Abströmung ist, daß das „Kontrollvolumen“ außerhalb der Systemgrenze als unendlich groß angenommen wird.

Zur Simulation eines veränderlichen Druckes kann für einen definierten Zeitpunkt eine Sprungantwort des Druckes mit einem Zielwert und einer Zeitkonstanten parametrisiert werden.

Vektor	1	Index Strömungseintritt
Parameter	p	Druck ab Simulationsbeginn
	T_r	Zeitpunkt der Druckänderung
	p_e	Zielwert für Druckänderung
	T_{63}	Zielkonstante für Druckänderung

Druckbedingung an der Systemgrenze

$$p_1 = p \quad \text{für } t \leq T_r \quad (443)$$

$$p_1 = p_e - (p_e - p) \cdot \exp\left(-\frac{(t - T_r)}{T_{63}}\right) \quad \text{für } t > T_r \quad (444)$$

4.7.3 Wärmesenke

Die Komponente Wärmesenke dient zur Definition eines Wärmeverlustes an einer Systemgrenze.

Charakteristisch für die Wärmesenke ist, daß die „Speichermasse“ außerhalb der Systemgrenze als unendlich groß angenommen wird.

Zur Simulation eines veränderlichen Wärmestromes kann für einen definierten Zeitpunkt eine Sprungantwort mit einem Zielwert und einer Zeitkonstanten parametrisiert werden.

Vektor	1	Index Eintrittsvektor Wärmestrom
Parameter	Q	Wärmestrom ab Simulationsbeginn
	T_r	Zeitpunkt der Wärmestromänderung
	Q_e	Zielwert für Wärmestromänderung
	T_{63}	Zielkonstante für Wärmestromänderung

Wärmeverlustbedingung an der Systemgrenze

$$Q_1 = Q \quad \text{für } t \leq T_r \quad (445)$$

$$Q_1 = Q_e - (Q_e - Q) \cdot \exp\left(-\frac{t - T_r}{T_{63}}\right) \quad \text{für } t > T_r \quad (446)$$

4.8 Stoffwerte und Hilfsgrößen

4.8.1 Thermo-Physikalische Stoffwerte

Für die Ermittlung des Prozeßverhaltens von Komponenten und deren Verschaltungen ist neben der Implementierung der Vorgänge in den Komponenten, wie z.B. Strömungskinetik, Ein- und Ausspeicherung oder Energieumwandlung, ganz wesentlich auch die korrekte und umfassende Implementierung der thermischen und kalorischen Zustandsgrößen sowie der physikalischen Transportgrößen für alle in Frage kommenden Medien bzw. Materialien.

Dazu wurden einheitlich für alle Medien und für alle Anlagenkomponenten Schnittstellenfunktionen definiert, welche jeweils einen Stoffwert in Abhängigkeit von zwei unabhängigen thermischen Zustandsgrößen, einer Medienkennzahl und nach Bedarf eines Vektors zur Charakterisierung einer Stoffzusammensetzung liefern.

Die Medienkennzahl wird dabei nicht explizit beim Funktionsaufruf im jeweiligen Programmteil der Anlagenkomponente gesetzt, sondern resultiert entsprechend den Stoffströmen in der Anlagenverschaltung aus den Angaben in den Randbedingungen bzw. aus den Umwandlungsprozessen in den Komponenten. Konsequenterweise sind die Anlagenkomponenten soweit als möglich medienunabhängig realisiert bzw. enthalten intern je nach Medienkennzahl entsprechende Verzweigungen oder Ersatzwertbildungen mit zugehörigen Diagnosemeldungen.

Entsprechend den Grundstrukturen des Datenhandlings kommen als unabgängige thermische Zustandsgrößen primär Druck und Enthalpie zum Einsatz - für diese sind alle erforderlichen Stoffwertfunktionen implementiert:

- spezifische isobare Wärmekapazität, Enthalpie und Entropie;
- spezifisches Volumen bzw. Dichte;
- Temperatur und, soweit relevant, spezifische Feuchte;
- Schallgeschwindigkeit und Isentropenkoeffizient;
- kinematische und dynamische Viskosität;
- Temperatur- und Wärmeleitfähigkeit.

Da in einzelnen Anlagenkomponenten intern auch die Temperatur eine Prozeßgröße darstellt, sind entsprechend alle Stoffwertfunktionen auch als Funktion der Temperatur anstelle der Enthalpie verfügbar.

Zusätzlich ist es für Durchströmprozesse in Kraft- und Arbeitsmaschinen auch noch erforderlich, Druck und Enthalpie als Rückwärtsfunktionen mit der Entropie als zweiter unabhängiger Zustandsgröße anzubieten.

4.8.2 Wasser und Wasserdampf

Seit 1997 ist die IF 97 [11] als Industrie-Formulation für die Ermittlung der Stoffeigenschaften von Wasser und Wasserdampf im gesamten technisch relevanten Bereich verbindlich und löste damit nach 30 Jahren die bis dahin zum Einsatz kommende IFC 67 [12] ab.

Wesentliche Vorteile der neuen Industrie-Formulation gegenüber der alten sind neben der Abbildung des Standes der thermodynamischen Forschung bezüglich der Genauigkeit der Daten eine Erweiterung des Geltungsbereiches, verbesserte Konsistenz an den Grenzen der Berechnungsgebiete, erhöhte numerische Güte und Effizienz der Approximationsformeln sowie ergänzende Rückwärtsfunktionen gegenüber der IFC 67.

Allerdings muß bei dem Vergleich von Berechnungsergebnissen, welche jeweils mit unterschiedlichen Formulationen gewonnen wurden, berücksichtigt werden, daß die Unterschiede in den thermodynamischen Werten und in abgeleiteten Kenngrößen nicht ohne weiteres zu vernachlässigen sind [28].

Für die Anwendung in der vorliegenden Arbeit konnte auf Quellcode der Mitentwickler der IF 97 zurückgegriffen werden [19], allerdings mußte dieser entsprechend den Systemkonventionen der Basissoftware Matlab angepaßt werden. Nur so konnten die Stoffwertberechnungen der IF 97 nahtlos in die entwickelte Simulationsumgebung integriert werden und gleichzeitig die Portabilität und Plattformunabhängigkeit der Modelle gewährleistet werden. Eine Nutzung direkt ausführbarer und am Markt verfügbarer Berechnungsbibliotheken hätte eine Beschränkung in dieser Hinsicht bedeutet.

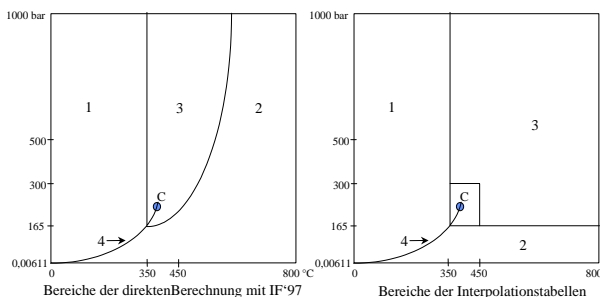


Abbildung 9: Aufteilung der Berechnungs- bzw. Interpolationsbereiche

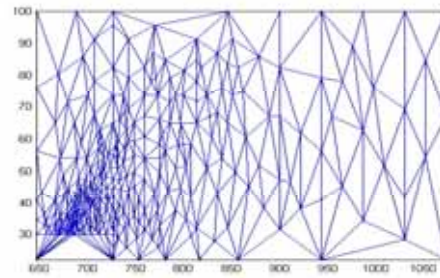


Abbildung 10: Beispiel für ein angepaßtes Dreiecksgitter

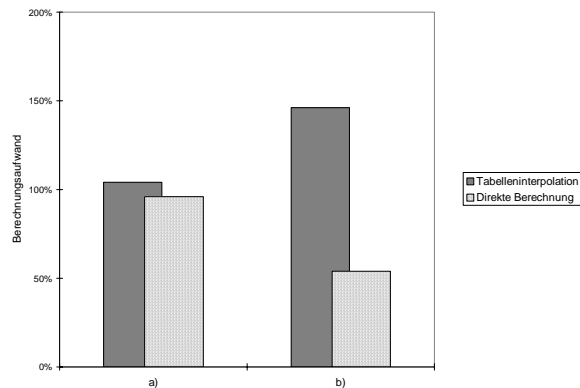


Abbildung 11: Vergleich Rechenaufwand
zwischen Interpolation und direkter Berechnung

a) "glatte" Bereiche entfernt von Kritischen Punkt bzw. Sättigung
b) Bereiche mit hohen Enthalpiegradienten

4.8.3 Luft und Rauchgas

Eine der umfassendsten Quellen für die Berechnung der Stoffeigenschaften für Luft und Rauchgas ist der NASA-Report SP-3001 [21], wie sie auch die Basis für die Bestimmung der Rauchgaseigenschaften in [3] dient. Zumindestens für die Ermittlung der kalorischen Eigenschaften sollte man allerdings auf neuere Quellen zurückgreifen, da die dort angeführten Approximationen auf Polynomen 4. Grades basieren, so daß unterschiedliche Koeffizientensätze für benachbarte Temperaturbereiche verwendet werden und die Grenztemperatur von 1000 K direkt im kesseltechnisch wichtigen Bereich liegt. Deshalb kommen für die Berechnung von Wärmekapazität, Enthalpie und Entropie die Polynome 12. Grades aus [1] zum Einsatz.

Augenmerk muß bei feuchter Luft und besonders bei Rauchgas mit seinen höheren Wassergehalten auf die Ermittlung der Stoffdaten für druckaufgeladene Kraftwerksanlagen gelegt werden, da Wasserdampf den stärksten Beitrag von allen Rauchgaskomponenten zum realen Gasverhalten liefert. Die Abbildung 12 und die Abbildung 13 zeigen, daß selbst bei normaler feuchter Luft bei Drücken ab 10 bar im Temperaturbereich unter 300 °C der Realgaseinfluß spürbar und

nicht mehr zu vernachlässigen ist. Aus diesem Grunde wurden die Stoffwert-Algorithmen soweit modifiziert, daß entsprechend seinem Partialdruck Wasserdampf gemäß IAPWS-IF 97 wie auch in Abschnitt 4.8.2 gerechnet wird.

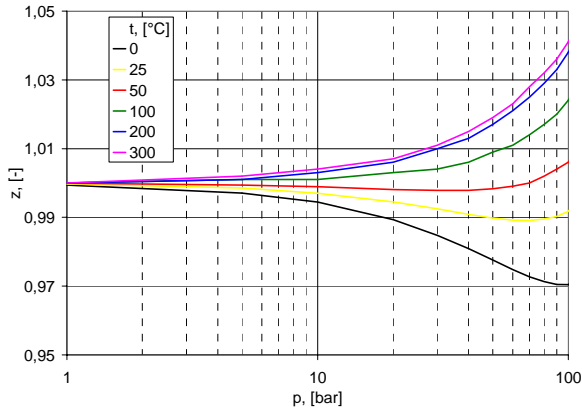


Abbildung 12: Kompressibilitätsfaktor feuchter Luft

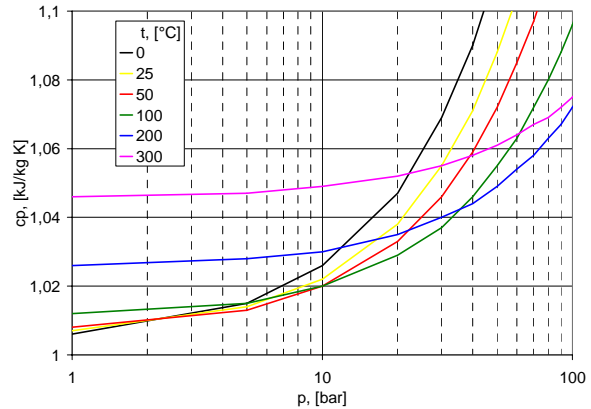


Abbildung 13: Spez. isobare Wärmekapazität feuchter Luft

4.8.4 Feste Einsatzstoffe und Konstruktionsmaterialien

Bestimmte Stoffwerte - im wesentlichen Wärmekapazität, Dichte und Wärmeleitfähigkeit - werden auch für Feststoffe benötigt.

Die Eigenschaften der Konstruktionsmaterialien für Wärmetauscher, Behälter und Rohrleitungen sind in der Regel gut durch die Ausrüster dokumentiert [25] und haben auch geringe Streubänder, da sie meist auch in der Herstellung standardisiert sind.

Anders stellt sich die Situation für die festen Einsatzstoffe Kohle, Sorbent, Asche und Inertmaterial dar. Liegen keine speziellen Untersuchungsergebnisse des Lieferanten oder eventuell des Anlagenbetreibers vor, kann man sich nur auf Richtwerte stützen, siehe z.B. [17]. Auch ist die Streubreite der Daten relativ groß. In kritischen Fällen muß dann bei Fehlen jeglicher Daten eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt werden - dies betrifft aber nur Wirbelschichtanlagen auf Grund der hohen Massenakkumulation an Bettmaterial.

5 Anwendung und Validierung der Komponentenbibliothek

5.1 Lastwechselverhalten einer niedrigexpandierten Druckwirbelschicht

5.1.1 Beschreibung der Schaltung

Bei dem Verfahren mit Druckwirbelschicht werden die Rauchgase direkt als Arbeitsmedium in der Gasturbine genutzt.

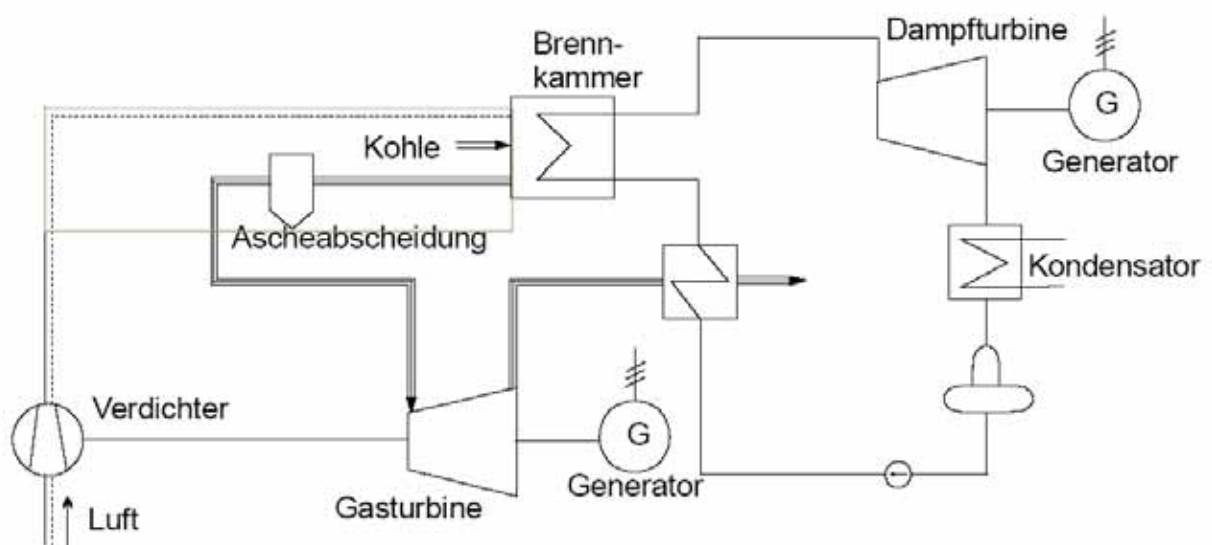


Abbildung 14: GuD–Anlage mit Druckwirbelschichtfeuerung

Der Aufwand für deren Reinigung ist geringer, da die stark korrosiv wirkenden Alkalien weitgehend mit der Wirbelbettasche abgeführt werden. Zudem ist die Abscheidung partikelförmiger Inhaltsstoffe im Rauchgas aufgrund der verfahrensbedingt geringen Verbrennungstemperaturen in der Wirbelschichtfeuerung von unter 900 °C wesentlich leichter. Deshalb wird ein mehrstufiger Zyklonabscheider zur Erzielung einer gasturbinenverträglichen Partikelkonzentration als ausreichend angesehen. Zusätzlich ist häufig eine weitere Niedertemperaturabscheidung des Reststaubes aus den Rauchgasen, beispielsweise mit Elektrofiltern erforderlich, um den Staubemissionsgrenzwert einzuhalten. Einerseits stellen die niedrigen Temperaturen der Druckwirbelschichtfeuerung gute Bedingungen für die Rauchgasreinigung dar, andererseits sind große Wirkungsgrad-

einbußen zu erwarten, da in diesem Fall keine Gasturbinentemperaturen über 1100 °C erreichbar sind. Um die Wirkungsgradeinbuße zu kompensieren, werden die Frischdampfparameter erhöht.

Der GuD-Prozeß mit integrierter Druckwirbelschichtfeuerung ist seit einigen Jahren eine kommerziell verfügbare Technologie, deren Entwicklung von der ABB Carbon bestimmt wurde ([30] und [31]). Die P200-Module mit einer thermischen Leistung von 200 MW und einer elektrischen Gesamtleistung von 84 MW (Gasturbine: 17 MW, Dampfturbine: 67 MW, Nettoleistung: 80 MW) wurden bisher in vier Kraftwerken, darunter im HKW Cottbus installiert, wobei ein Nettowirkungsgrad von 41,5 % erzielt wurde. Auf dem folgenden Bild ist zu erkennen, daß die stationäre Druckwirbelschichtfeuerung und die Heißgaszyklone zur Rauchgasentstaubung in einem gemeinsamen Druckbehälter untergebracht sind.

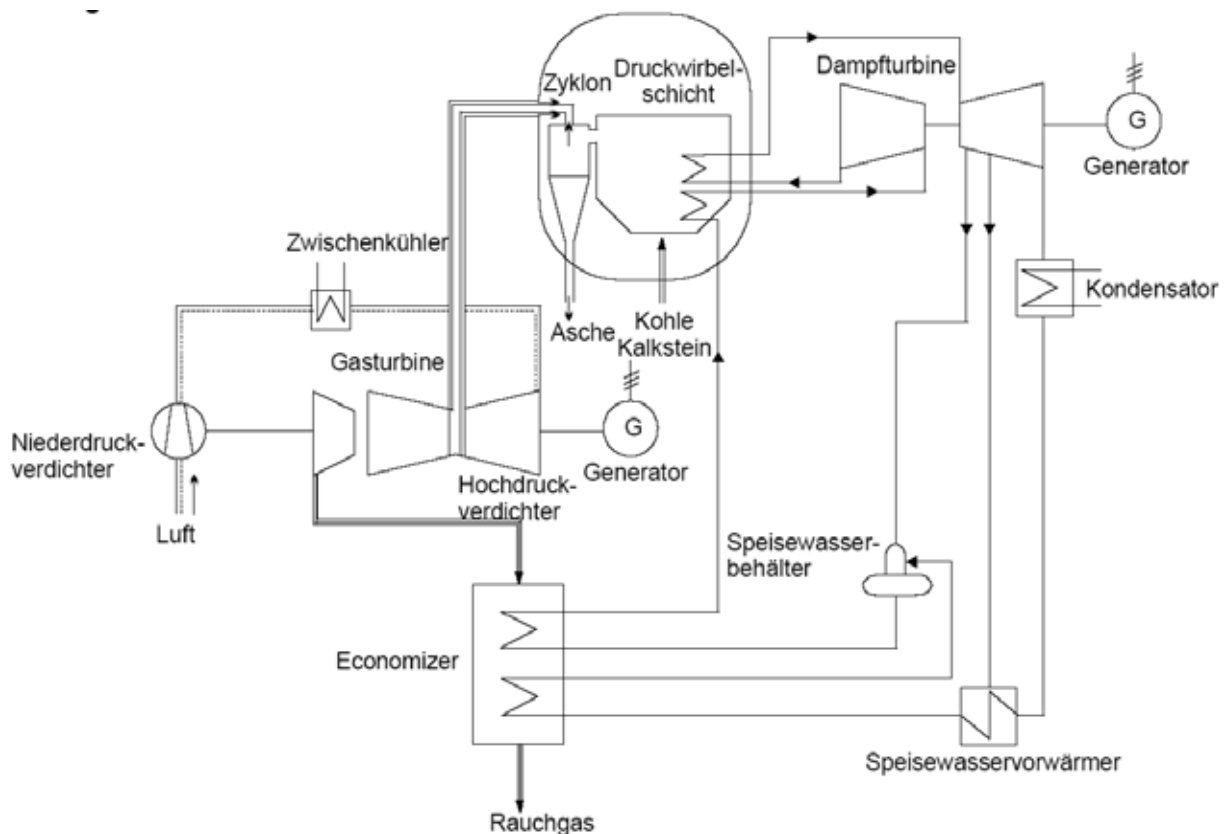


Abbildung 15: P200-Module

Die Verbrennungsluft wird nach einer zweistufigen Verdichtung mit Zwischenkühlung durch das Kondensat des Dampfkreislauf zum Druckreaktor gefördert. Die Luft zur Vorwärmung wird durch das äußere Rohr einer coaxialer Rohrleitung geführt, während die heißen, in sechs parallelen, zweistufigen Zyklonen weitgehend von der Flugasche gereinigten Rauchgase im Innenrohr zur Gasturbine geleitet werden. Aufgrund der dem Betriebsdruck von ca. 12 bis 16 bar direkt proportionalen Energiedichte ist der DWSF-Reaktor bei gleicher Leistung deutlich kleiner als ein konventioneller kohlestaubbefeuerter Kraftwerkskessel; bei 80 MW beispielsweise beträgt der Höhenunterschied 34 m. Die Temperaturmaximum wird auf ca. 830 °C bis 860 °C begrenzt, um dadurch die Ascheerweichung zu vermeiden und optimale Reaktionsbedingungen für die Einbindung des Schwefels durch Kalksteinzugabe zu gewährleisten. Die homogene Temperaturverteilung und die lange Aufenthaltszeit von über 4 s im Wirbelbett und ca. 3 bis 4 s im darüber befindlichen Freiraum erlaubt den Einsatz eines breiten Kohlebandes hinsichtlich Wasser-, Asche- und Flüchtigengehalt. Dies garantiert auch bei Kohlen mit hohem Ascheanteil einen nahezu vollständigen Ausbrand. Der Einfluß des Druckes wirkt sich sowohl auf die Beschleunigung des Kohlenstoffumsatzes als auch auf die Schwefeleinbindungsreaktionen vorteilhaft aus. Die Teillastfälle bis zur Mindestlast von 30 % sind durch die Abnahme der Wirbelbetthöhe bei konstanter Temperatur einstellbar. Die Anfahrzeiten aus dem kalten Zustand liegen zwischen 5 bis 6 Stunden mit Änderungsgeschwindigkeiten der Leistung von ca. 4 % pro Minute.

5.1.2 Parametrierung, Simulation, Ergebnisse

Für eine Verifizierung eigener Berechnungen zum Betriebsverhalten der Druckwirbelschicht in Kombination mit dem Betriebsverhalten der Gasturbinenanlage lagen für das Druckwirbelschichtkraftwerk Daten für einen konkreten Lastwechsel vor:

- Massenstrom Ölbrenner Freiraumfeuerung, [l/s] HUF30FF901
- Austrittsdruck Hochdruckverdichter, [bar] MBT10FP903
- Lufteintrittstemperatur Wirbelschicht, [°C]) HBE10CT00x
(Temperatur im Druckbehälter)

• Wirbelschichttemperatur bei 3,8 m Höhe, [°C]	HBK10CT2x
• Rauchgasaustrittstemperatur, [°C] (Eintritt Primärzyklon)	HDF10CT00x
• Wirbelschichthöhe, [m]	HBK10FL901
• Gasturbineneintrittstemperatur, [°C] (Austritt Sekundärzyklon)	HNA10CT00x
• Gasturbinenaustrittstemperatur, [°C]	MBT10CT110
• Gasturbinenleistung, [MW]	MKA10CE301
• Speisewassermenge, [kg/s]	LAB80FF901
• Frischdampfmenge, [kg/s]	LBA11FF901
• Frischdampftemperatur, [°C]	LBA11FT901
• Zwischendampftemperatur, [°C]	LBB11FT901
• Hochdruckdampfturbinenleistung, [MW]	MKA10CE301

Da die Betthöhenmessung für die Wirbelschicht im Vergleich zur Messung anderer Prozeßdaten mit relativ hohen Unsicherheiten behaftet ist, wurden die Last und der Lastwechsel der Wirbelschichtfeuerung anhand mit der Speisewassermengenummessung in Relation gesetzt. So begann die Simulation bei einer Last von 87 % und endete bei einer Last von 61 % mit einem Lastwechselgradienten von 0,7 %/min.

Das Szenario für die Simulation wurde in einem zentralen Steuermodul hinterlegt. Nach der Darstellung wesentlicher Bereiche der Simulink-Modellstruktur (Abbildung 16 und Abbildung 17) sind im Folgenden die Ergebnisse der eigenen Simulationsrechnung mit den zur Verfügung stehenden Daten aus dem Anlagenbetrieb gegenübergestellt und diskutiert.

Abbildung 18 stellt die Tatsache dar, daß für die Simulation die Speisewassermenge die Führungsgröße darstellt und wie diese Speisewassermenge in der Simulation an die Meßdaten angepaßt wurde.

In der Simulation folgt die Frischdampfmenge der Speisewassermenge mit einer gewissen positiven konstanten Abweichung. Diese Differenz ergibt sich in der Simulation aus der Bilanz der Überhitzereinspritzung.

In den Meßdaten zeigt sich ein abweichendes Verhältnis zwischen Speisewassermengen und Frischdampfmenge – die Frischdampfmenge ist annähernd gleich bzw. leicht kleiner als die Speisewassermenge – die Differenz variiert zwischen $-1,1$ und $+0,4$ kg/s. Dieses Verhalten läßt sich nur durch Meßorteffekte und Meßstellenkalibrierung erklären.

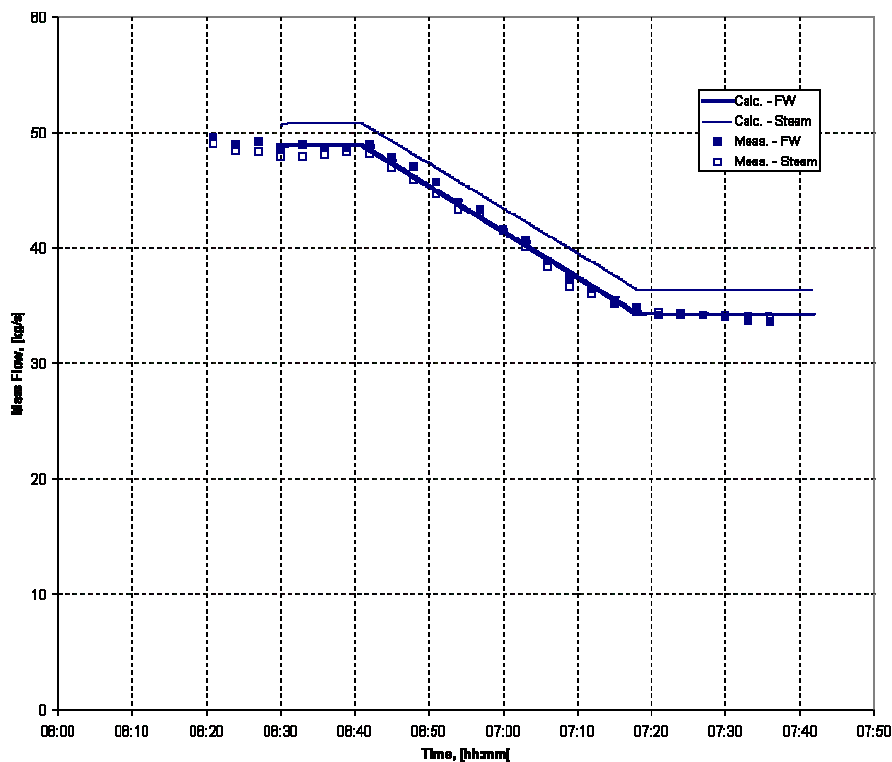


Abbildung 18: Speisewassermenge und Frischdampfmenge

Wie schon zu Anfang festgestellt wurde, ergibt die Wirbelschichthöhenmessung in der zur Verfügung stehenden Meßkampagne keine ausreichen genauen Ergebnisse. Allerdings kann sicher vorausgesetzt werden, daß diese fehlerbehafteten Meßwerte zumindestens den Trend richtig wiedergeben.

So sind in Abbildung 19 die gemessenen und die gerechneten Werte für die Betthöhe gegenübergestellt. Daraus ergibt sich die Schlußfolgerung, daß die Betthöhenabsenkung im realen Betriebsverlauf schneller als die Verminderung der Speisewassermenge erfolgte und einen Gradienten zwischen 0,9 und 1,0 %/min erreichte. Dies korrespondiert auch mit den Daten des Verdichteraustrittsdruckes (s. Abbildung 24).

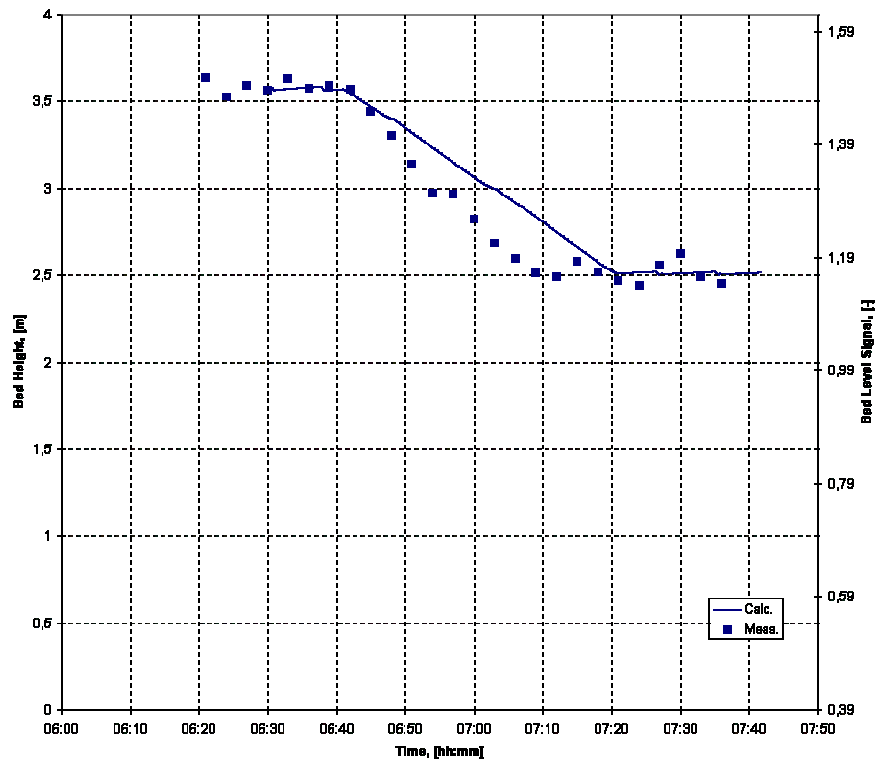


Abbildung 19: Wirbelschichthöhe

Die Parameterverläufe in Abbildung 20 sowie die Abbildung 21 charakterisieren das Verhalten des Wasser-/Dampfkreislaufes. Wie ersichtlich ist, wurden die Dampftemperaturen in der Simulation nicht geregelt, so daß die rechnerischen Werte und Gradienten nicht direkt mit den Meßwertern für die Frisch- und Zwischendampftemperaturen verglichen werden können.

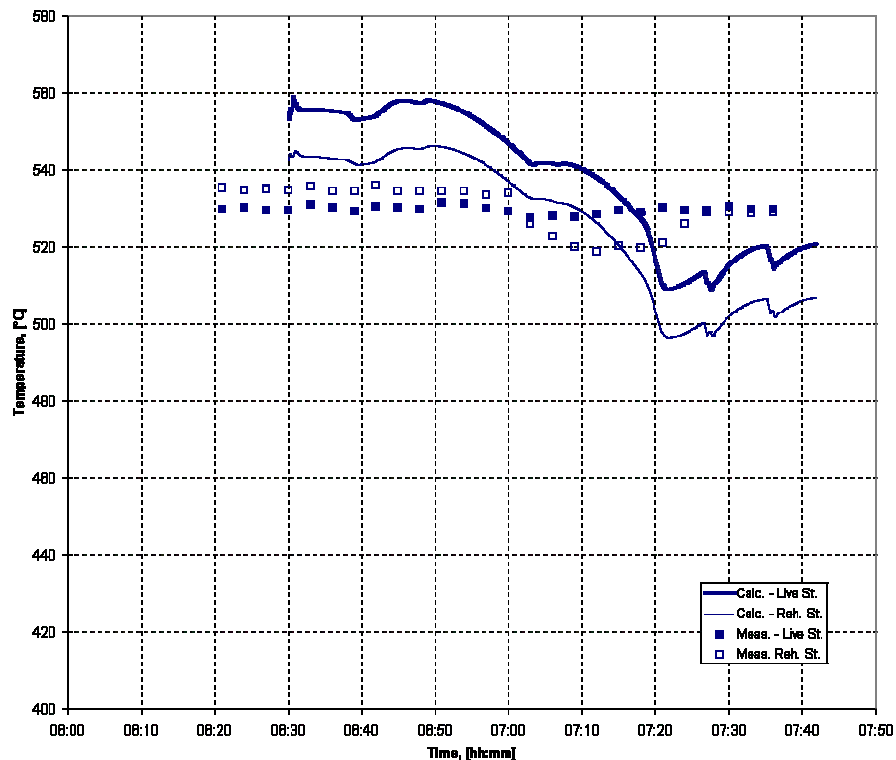


Abbildung 20: Frisch- und Zwischendampftemperaturen

Die Trend der in der Simulation berechneten Leistung der Hochdruckdampfturbine reproduziert das Verhalten der Meßwerte, allerdings auf einem höheren Niveau. Die Ursache hierfür kann in einem unbekannten anderen Druckniveau am Turbineneintritt aufgrund eines anderen Öffnungsgrades des Hochdruckventils als in der Simulation und/oder an einem anderen Zwischendampfdruck liegen.

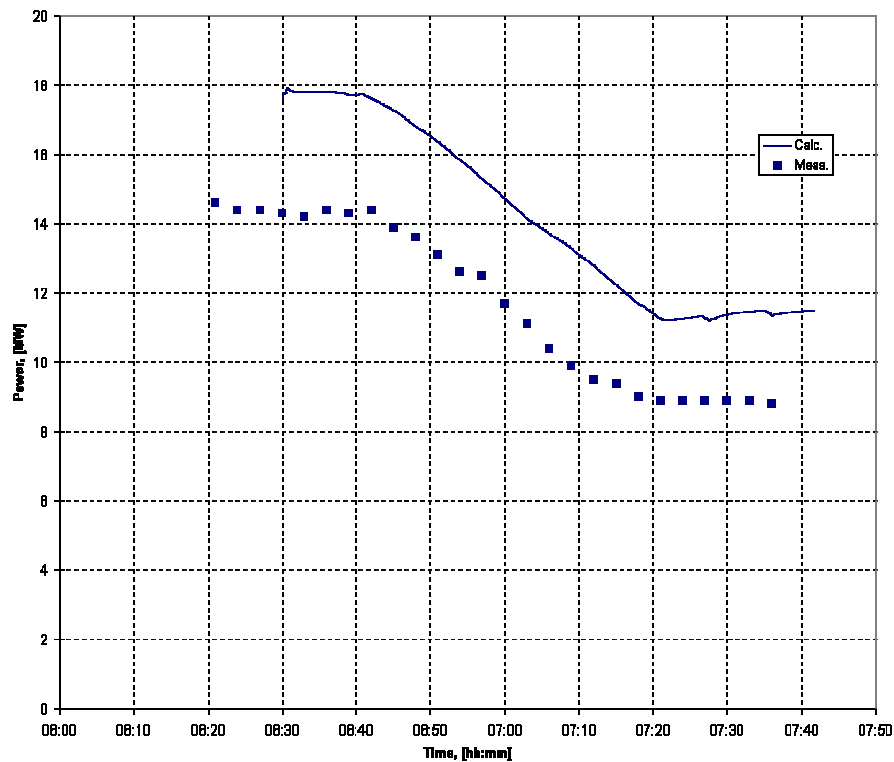


Abbildung 21: Hochdruckdampfturbine

Die Abweichungen in der Gasturbinenleistung zwischen den rechnerischen Werten der Simulation und den gemessenen Werten sind ein Ergebnis einer andauernden Zusatzfeuerung im Freiraum oberhalb der Wirbelschicht mit 0,4 bis 0,5 l/s Öl während der gesamten Betriebszeit.

Gleichfalls stellt die Zwischenspitze in den Meßwerten mit einer gewissen Verzögerung eine Reaktion auf die Anhebung der Ölmenge in der Freiraumfeuerung dar.

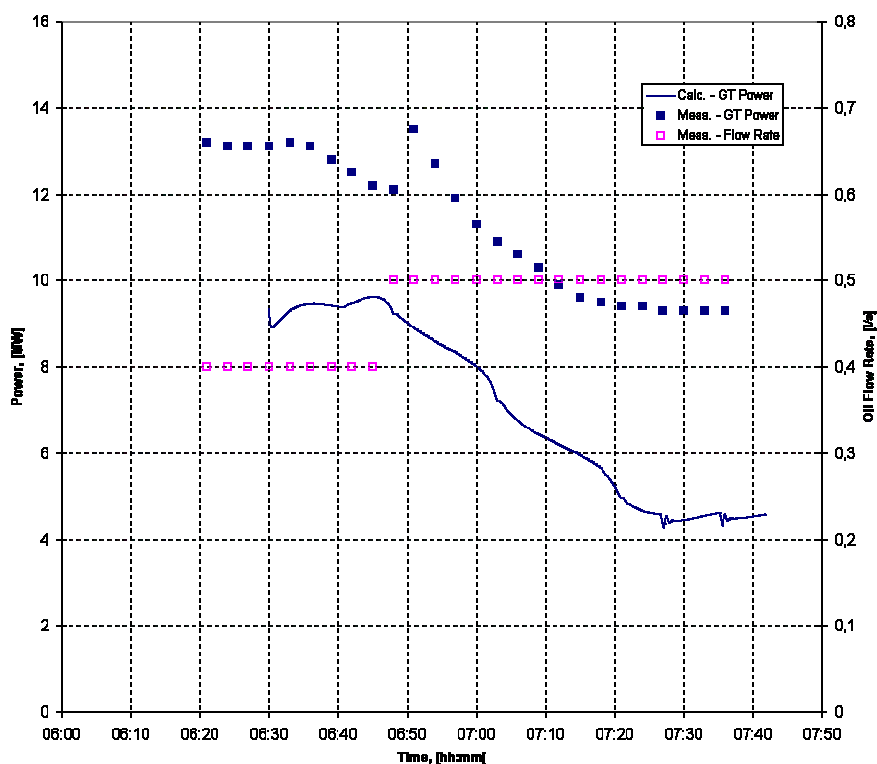


Abbildung 22: Gasturbinenleistung und Ölmenge Freiraumfeuerung

In Abbildung 23 sind Daten zum Gastrakt und zum Feuerungsverhalten zusammengefaßt. Die gemessene Gasturbineneintrittstemperatur ist aufgrund der durchgängigen Freiraumfeuerung gleichbleibend, d.h. für den Vergleich mit der Simulation können nur die bei einer Betthöhe von 3,8 m gemessenen Temperaturen herangezogen werden (In der Abbildung sind nicht nur der zeitliche Trend sondern auch die Streubreite der gemessenen Temperaturen dargestellt). Die höheren rechnerischen Temperaturen der Simulation sind offensichtlich ein Ergebnis einer nicht ausreichenden Anpassung der Wärmeübertragungskorrelation an die Wirbelschicht. Spezifisch für die Implementierung des Simulationsmodells ist die Abstufung des Temperaturgradienten zu charakteristischen Zeitpunkten. Zu diesen Zeiten werden durch die Betthöhe die Grenzen der diskreten Volumina erreicht, in welche die Wirbelschicht für die Simulation unterteilt ist. Dies ist ein rein numerischer Effekt, wenn die Masse des Feststoffinventars in einem Grenzvolumen annähernd gleich oder kleiner der Gasmasse in diesem Rechenvolumen ist.

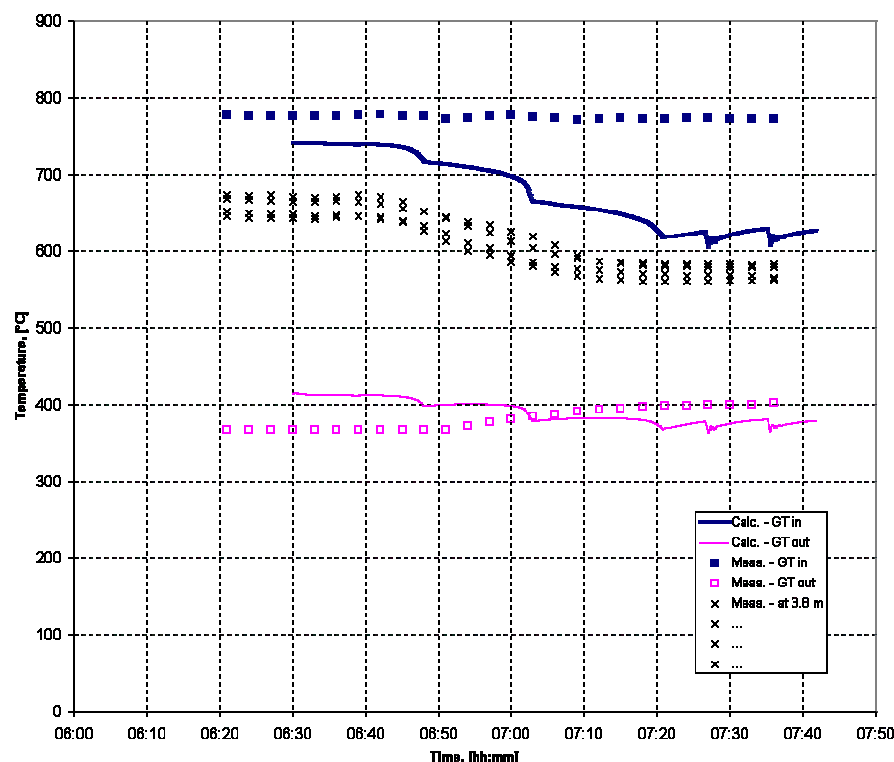


Abbildung 23: Temperaturen Wirbelschicht- und Gasturbinenaustritt

Abschließend ist in Abbildung 24 der Verdichteraustrittsdruck dargestellt.

Der leicht unterschiedliche Gradient ist in Zusammenhang mit dem unterschiedlichen Verhalten von Betthöhe und Speisewassermengen zu sehen. Außerdem ist zu berücksichtigen, daß für die Simulationen auch nur modifizierte Kennfelder des Herstellers für die Gasturbinenkomponenten zur Verfügung standen.

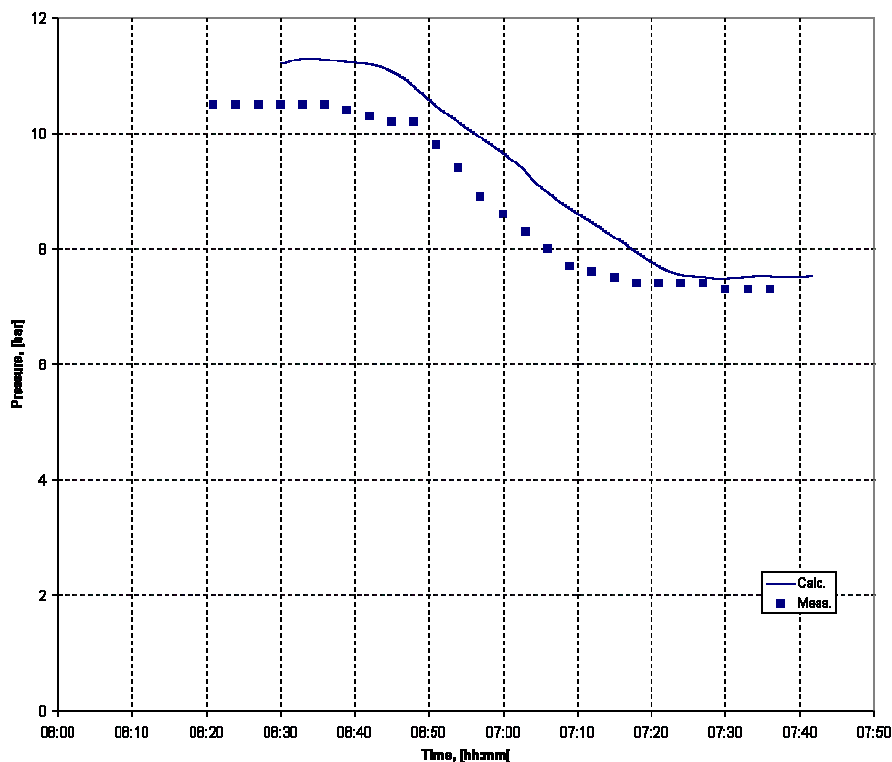


Abbildung 24: Kompressorausstrittsdruck

5.2 Simulationsergebnisse einer komplexen Kraftwerksschaltung

5.2.1 Beschreibung der Schaltung

Die Darstellungen der Struktur der untersuchten Kraftwerksschaltung erfolgt im Anhang. Die Bezeichnung der einzelnen Elemente erfolgte nach dem Kraftwerkskennzeichnungssystem. Dabei konnte jede Bezeichnung in Simulink nur einmal verwendet werden, um eine eindeutige Zuordnung der Bauteile zu ermöglichen. Deshalb ist es bei einigen Bauteilen notwendig geworden, eine Änderung der Bezeichnung im Modell durchzuführen. Gleichzeitig wurden einigen Komponenten zur besseren Übersichtlichkeit zusammengefaßt und ebenfalls eine neue Nummer in Anlehnung an die Originalnummern vergeben.

Vereinfacht stellt sich das Kraftwerk wie folgt dar:

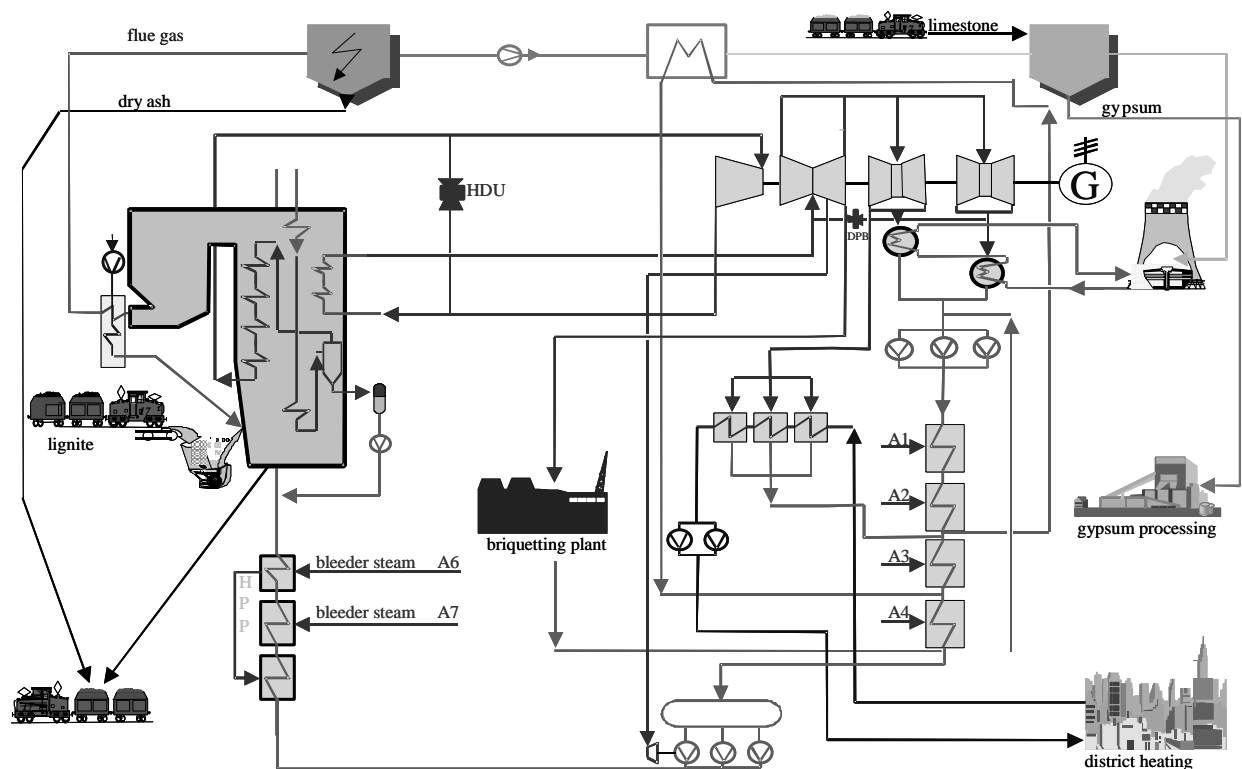


Abbildung 25: Anlagenübersicht des Kraftwerkes

Als Grenzen wurden folgende Punkte definiert:

Eintritt:

- Kohlelieferung vom Tagebau
- Kalklieferung von Lieferanten
- Strombezug aus dem Verbundnetz
- Frischluft aus der Umgebung

Austritt:

- Ascheentsorgung auf die Deponie
- Gipsentsorgung auf der Deponie oder Lieferung zum Kunden
- Rauchgasemission in die Umgebung

Rückführung:

- Fernwärme
- Prozeßdampf

Zur Strukturierung des Kraftwerkes wurde es in mehrere Teilsysteme unterteilt.

- Zentrale Ver-/Entsorgung
- Block A
- Block B
- Fernwärme-Schiene
- Prozeßdampf-Schiene
- Elektro-Schiene

Im weiteren soll auf die technische Beschreibung dieser Teilsysteme näher eingegangen werden.

Jeder Block besteht aus 7 Hauptanlagen:

- Bekohlung
- Dampferzeuger
- Turbinen
- Speisewassersystem
- Kühlwassersystem
- Luft-/Rauchgassystem
- Generator.

Die daraus abgeleitete Modellstruktur für Simulink findet sich vollständig im Anhang wieder. Stellvertretend sei hier nur die Modellstruktur der Blockebene dargestellt:

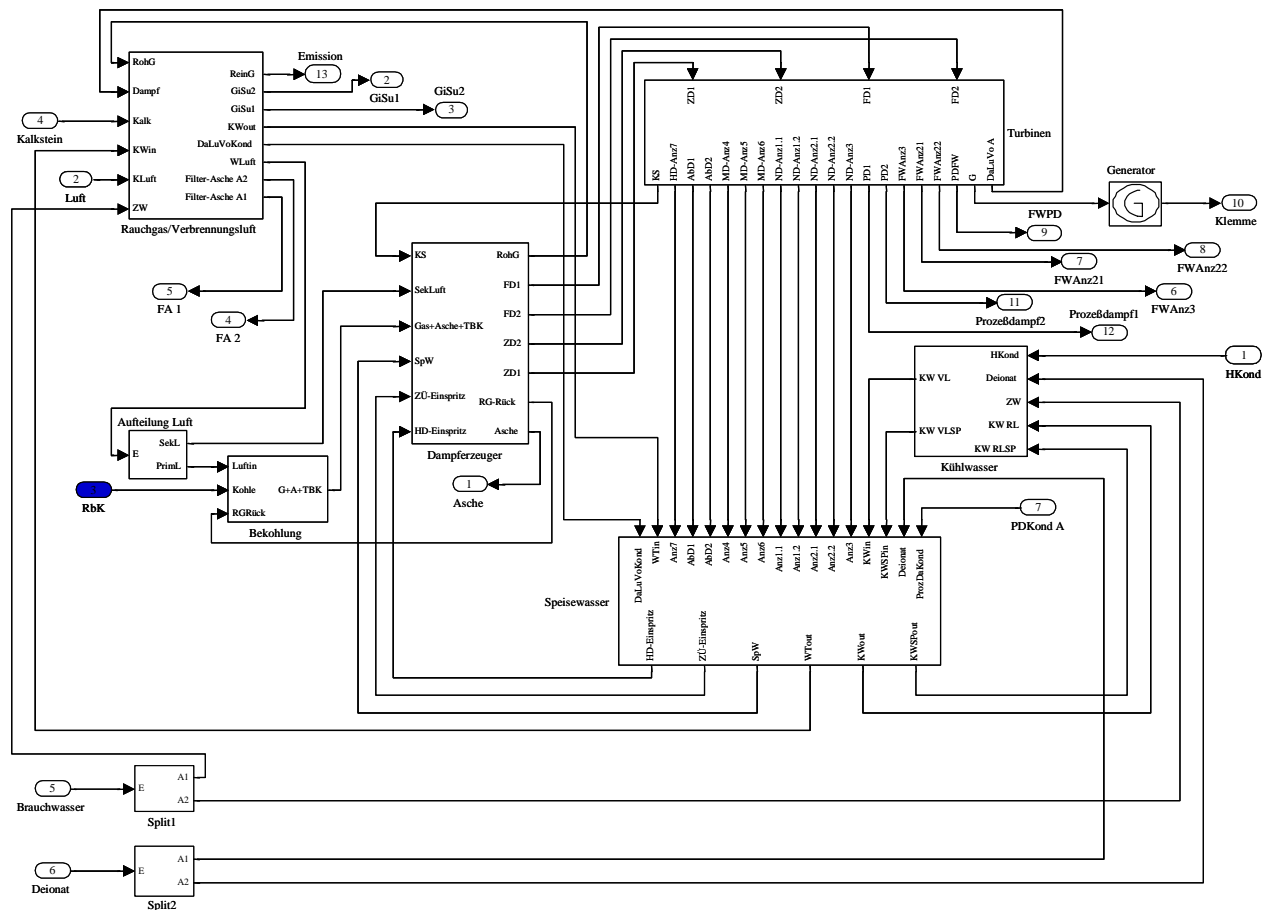


Abbildung 26: Modellstruktur Wasser - / Dampf - Kreislauf

5.2.1.1 Dampferzeuger

Die Trockenkohle und das Gas-Dampf-Gemisch gelangt, von der Mahltrocknung kommend, in die Brennkammer. Dort verbrennt die Kohle unter Energiefreisetzung zu Asche und Rauchgas. Zur Berechnung der Verfügbarkeit wurden die Kohlenstaub- und die Brüden-Brenner (HHA01 und HHD01) zusammengefaßt, aber getrennt von der Brennkammer dargestellt. Der Brennkammer sind die Heizflächen nachgeschaltet. Auf der einen Seite der Heizfläche liegt das Rauchgas vor, auf der anderen das Wasser bzw. der Dampf. Im Modell sind diese Heizflächen getrennt dargestellt. (Abbildung 49)

In der wasserseitigen Heizflächen sind im System Wasser-Dampf-Seite zusammengefaßt. (Abbildung 50) In diesen strömt das Speisewasser, das durch die bei der Verbrennung entstehende Wärme im Economizer erwärmt und im Verdampfer verdampft wird. Die KKS-Nummern im Economizer (A 0HAC10,15 und 20) sowie im Verdampfer (A 0HAD10-40) wurden zu A 0HAC0 und A 0HAD0 zusammengefaßt. Nach dem Verdampfer (Abbildung 51) sind Abscheider (A 0HAD71-76) angeordnet, die eine evtl. noch vorhandene flüssige Phase vom Dampf trennt und sie dem Speisewasserkreislauf zuführt. (Abbildung 52) Das Wasser wird über ein Niveaugefaß (A 0HAG10) und eine Umwälzpumpe (A 0HAG40) im Kreislauf gefahren.

Danach folgen auf der Dampfseite die Überhitzerheizflächen (Abbildung 53). Zur Steuerung der Dampfparameter sind Anschlüsse zur Kühlung eingebaut, wo Speisewasser eingespritzt wird (A 0HAH51-54 sowie A 0HAH71-74). Der überhitzte Dampf wird als Frischdampf zur Hochdruckturbine (Abbildung 58) geführt. Zur Umfahrung der Hochdruckturbine ist eine Hochdruckumleitstation bestehend aus 4 Reduzierventilen mit Einspritzung vorhanden (A 0LBF11-14). Da die Heizflächen der Überhitzer 2-4 im Kraftwerk mit der gleichen KKS-Nummer belegt sind, wurde zur eindeutigen Identifizierung die Strangnummer als 2. Zeichen in der einer neuen KKS vergeben (Bsp. A 1HAH37).

Die kalte Schiene der Hochdruckturbine wird in den Dampferzeuger zurückgeführt und in Zwischenüberhitzern nochmals erhitzt, bevor sie in die Mitteldruckturbine strömt (Abbildung 54). Die Steuerung der Dampfparameter erfolgt mit einer Einspritzkühlung (A 0HAJ31-34) nach dem gleichen Prinzip, wie zwi-

schen den Überhitzerheizflächen. Für die Heizfläche ZÜ2 im Zwischenüberhitzer wurde gleichfalls eine neue KKS vergeben (original A 0HAJ37, jetzt A 1-4HAJ37). Die Zwischenüberhitzungs-Sicherheitsventile A 0LBB 31,32,41,42 wurden zu A 0LBB0 zusammengefaßt.

5.2.1.2 Luftvorwärmungs- und Rauchgassystem

Das Rauchgassystem beinhaltet sowohl die Rauchgasreinigung als auch die Luftvorwärmung. Als Rauchgas wird das bei der Verbrennung entstehende Abgas bezeichnet. Dabei wird ein Teil der Asche mitgerissen, der später vom Gasstrom abgetrennt wird. Für jeden Block sind 2 Rauchgasstränge vorhanden. (Abbildung 55)

Nach dem Dampferzeuger wird Rauchgas auf beide Stränge aufgeteilt. Danach wird es im Rauchgas-Luftvorwärmer (A 1/2HLD01) abgekühlt. Anschließend wird die Trockenasche in den Elektro-Filtern (A 1/2HQA10+20, Abbildung 56) vom Gasstrom getrennt und der Filterascheaufbereitung (Abbildung 41) zugeführt. Den E-Filtern schließt sich der Saugzug (A 1/2HNC01) und der Rauchgaswärmetauscher (A 1/2HTB30) an. In diesem wird das Rauchgas mit Hilfe von Kühlwasser weiter abgekühlt. Zum Schluß der Rauchgasstränge wird das Rohgas in der Rauchgasentschwefelungsanlage (REA, A 1/2HTD10) gereinigt und danach als Reingas in die Umgebung emittiert.

Der zur Verbrennung benötigte Sauerstoff bzw. die Luft wird von Frischlüftern (A 1/2HLB01) angesaugt und in Dampf-Luftvorwärmern (original A 1/2HLC11+12, zusammengefaßt zu A 1/2HLC0) erwärmt. Die benötigte Wärmemenge wird durch die Kondensation von Dampf bereitgestellt. Der benötigte Dampf wird von den Anzapfungen 6 und 7 den Turbinen (Abbildung 57) entnommen. Nach dem Frischlüfter wird die vorgewärmte Luft in den Rauchgas-Luftvorwärmern weiter erhitzt und dann der Bekohlung und dem Dampferzeuger zugeführt. Die in der REA ablaufenden chemischen Prozesse werden nicht abgebildet, sondern nur die Bilanzen der ein- und austretenden Stoffströme.

5.2.1.3 Turbinen

Jeder Block besitzt eine viergehäusige Turbine,

- eine Hochdruck-Turbine (HDT, A 0MAA10),
- eine Mitteldruck-Turbine (MDT, A 0MAB50) und
- zwei Niederdruck-Turbinen (NDT, A 0MAC10+20 zusammengefaßt zu A 0MAC0).

Alle Turbinen und der Generator (A 0MKA0) sind auf einer Welle angeordnet (Abbildung 57). Zur Übersichtlichkeit ist diese mit einem Symbol und der Beschriftung W und einer Nummer gekennzeichnet. Da für jede Turbine nur eine KKS-Nummer vergeben wurde, ist diese einer Turbinenstufengruppe zugeteilt wurden. Die anderen Turbinenschaufelgruppen wurden zur eindeutigen Markierung mit T und einer fortlaufenden Nummer bezeichnet.

Der aus dem Dampferzeuger austretende Frischdampf wird über die HDT geleitet und danach in die Anzapfung 7 und die kalte Schiene aufgeteilt (Abbildung 58). Zur Umfahrung der Mittel- und Niederdruck-Turbinen sind 2 Niederdruckumleitstationen (NDU) integriert (A 0MAN40+60). Der zwischenüberhitzte Dampfmenge kann durch eine Regelklappe (A 0MAC11) zwischen MDT und NDT gesteuert werden.

Der Hochdruckturbine vorangestellt sind zwei Schnellschlußventile (je Strang eines, A 0MAA21+22, Abbildung 59). Das Wellenende an der HDT wird durch einen Steuerkopf symbolisiert.

Die kalte Schiene wird in den Zwischenüberhitzer zurückgeführt und nochmals erhitzt. Der Dampf vom Zwischenüberhitzer wird dann auf die MDT geführt. Die Turbine ist 2-flutig mit asymmetrisch angeordneten Anzapfungen (Abbildung 60). Der Abdampf aus der MDT wird anschließend über die Regelklappe (A 0MAC11) den NDT zugeführt.

Die Niederdruck-Turbinen bestehen aus zwei 2-flutige Turbinen mit asymmetrischen Anzapfungen (Abbildung 61). Die genaue Anordnung und Verteilung der Anzapfungen der MDT und NDT sind den zugehörigen Bildern zu entnehmen.

5.2.1.4 Kühlwassersystem

Das Kühlwasser kühlt den Abdampf der Niederdruck-Turbinen und der Speisewasser-Antriebsturbine SPAT. Der Hauptkühlstrang umfaßt den Kühlturm (A 0URA) und die Kühlwasserpumpen (A 0PAC10+20). In den Hauptkühlwasserstrom kann Zusatzwasser über das Nebenkühlwassersystem (PCB) eingespeist werden. Zusätzlich ist ein Zwischenkühlkreislauf vorhanden. Ein Teil des Kühlwassers wird nach den KW-Pumpen in 3 parallelen Zwischenkühlern (A 0PGD01-03) weiter abgekühlt. Als Kühlmedium, welches mit 3 redundanten Pumpen (A 0PGC01-03) gefördert wird, steht Kondensat aus den Erhitzern der Fernwärme und Deionat aus der Wasseraufbereitung zur Verfügung. (Abbildung 34)

5.2.1.5 Speisewassersystem

Das Speisewassersystem umfaßt folgende Komponenten (siehe Abbildung 63):

- Kondensatoren
- Prozeßdampfkühler
- Kondensatreinigungsanlage (KRA)
- Niederdruckvorwärmer (NDVW)
- Speisewasserbehälter
- Speisewasserpumpen
- Hochdruckvorwärmer (HDVW).

Jede Niederdruckturbine besitzt einen Kondensator der in 2 Bereiche mit unterschiedlichen KKS-Nummern unterteilt ist (A 1/2MAG10+20). Der Kühlwasserstrom wird jeweils in Reihe durch die Kondensatoren geführt. In den Kondensatoren kondensiert der Abdampf aus den Niederdruckturbinen und der NDU. In die Kondensatsammelleitung nach den Kondensatoren kann Deionat und das Kondensat von NDVW eingespeist werden. (Abbildung 64)

Danach fließt das Kondensat durch die Kondensatvor- und Kondensathauptpumpen (A 0LCB11-13 und A 0LCB31-33) sowie die Kondensatreinigungsanlage (KRA, A 0LD) und wird mit dem Prozeßdampfkondensat gemischt. Das eingespeiste Prozeßdampfkondensat wird vorher im Prozeßdampfkühler (A 0LCA50) noch abgekühlt.

Die Abläufe in der KRA werden bei der Modellierung aber nicht näher betrachtet, da sie nur Auswirkungen auf die Zusammensetzung des Kondensats, nicht aber auf die Prozeßparameter besitzen (Abbildung 65).

Der Kondensatstrom gelangt nach der KRA in die Niederdruckvorwärmung. Die ND-Vorwärmer (LCC) werden durch Anzapfungen von den Turbinen gespeist (Abbildung 66). Das dabei entstehende NDVW-Kondensat wird in die Kondensatsammelleitung nach den Kondensatoren eingespeist. Das Anzapfdampf-kondensat aus dem NDVW-A3 kann über 2 Umwälzpumpen (A 0LCJ31-32) in die Hauptkondensatleitung eingespeist werden (Abbildung 67). Ein Wärmetauscher kann zur Wärmeverschiebung mit dem Rauchgassystem verwendet werden (A 0HTB20). Dieses Rauchgaskühlsystem wird über zwei Umwälzpumpen (A 0HTB11+12) betrieben. Die Wärmeverschiebung kann über Schaltungsvarianten auch umfahren werden (Abbildung 68).

Nach der Niederdruckvorwärmung wird das Speisewasser im Speisewasserbehälter (A 0LAA50) zwischengespeichert. In diesen wird auch das Kondensat von der HDVW und den Dampf-Luftvorwärmern eingespeist.

Vom Speisewasserbehälter gelangt das Speisewasser über die Speisewasserpumpen in die Hochdruckvorwärmung. Es existieren 2 elektrisch angetriebene Pumpen (ESP, A 0LAC20+30) und eine von einer Dampfturbine (TSP, A 0XAA10) über eine Welle direkt angetriebene Speisewasserpumpe (SPAT, A 0LAC10, Abbildung 69). Alle 3 Pumpen sind redundant geschaltet. Die Turbine wird mit Dampf aus den Anzapfungen 5 und 7 betrieben. Der Kondensator der Turbine (A 0XAG01) ist an den Kühlwasserkreislauf angeschlossen. Das dabei entstehende Kondensat wird über 2 redundante Umwälzpumpen (A 0XAJ21+22) und den Schwadenkondensator (A 0XAW50) nach der KRA in den Speisewasserkreislauf eingespeist. Von allen drei Speisewasserpumpen gehen Ausschleusungen zur Zwischenüberhitzereinspritzung (Abbildung 54).

Die Hochdruckvorwärmer (A 0LAD60+70) sind nach den Speisewasserpumpen angeordnet. Die Vorwärmer werden durch die Anzapfungen 6 und 7 gespeist, deren Kondensat zum Speisewasserbehälter zurückgeführt wird. (Abbildung 70)

Nach dem HDVW ist eine Abzweigung zur HD-Einspritzung (Abbildung 53) vorhanden. Das vorgewärmte Speisewasser gelangt in den Dampferzeuger (Abbildung 49) und wird dort verdampft.

5.2.2 Parametrierung, Simulation, Ergebnisse

Mit dieser Arbeit wird eine Validierungsrechnung des dynamischen Kraftwerksmodells beispielhaft am Verhalten der Frischlüfter dokumentiert.

Für die Validierung standen Daten für Laststeigerungen, Lasteinsenkungen sowie eine Straßenabschaltung Verfügung.

Entsprechend einem vereinbarten Umfang werden Daten als Sekundenwerte für ein Zeitfenster von vorzugsweise 30 min vor und 120 min nach Ereignis-Zeitmarke aus dem Archiv ausgekoppelt.

Für die vorliegende Validierung standen folgende Datenreihen zur Verfügung:

```
0MKA01 CE040 XQ01 S7 P Generator MW
0HAH80 CF901 XQ01 S1 F FD Dampferzeuger kg/s
0HLA10 CP901 XQ03 S6 P Heißluft Ringleitu mbar
0HLA10 CT910 XQ01 S6 T heiLu RingLtg li SeWd °C
1HLA30 CP001 XQ01 S5 P FriLu hi FriLü 1 mbar
1HLA12 CT001 XQ01 S5 T FriLu InnAnsg Str 1 °C
1HLA55 CP001 XQ01 S5 P HeiLu-Rückführung Str 1 mbar
1HLA55 CT001 XQ01 S5 T HeiLu-Rückführung Str 1 °C
1HLA55 CF001 XQ01 S5 F HeiLu-Rückführung Str 1 kg/s
2HLA30 CP001 XQ01 S5 P FriLu hi FriLü 2 mbar
2HLA12 CT001 XQ01 S5 T FriLu InnAnsg Str 2 °C
2HLA55 CP001 XQ01 S5 P HeiLu-Rückführung Str 2 mbar
2HLA55 CT001 XQ01 S5 T HeiLu-Rückführung Str 2 °C
```

2HLA55 CF001 XQ01 S5 F HeiLu-Rückführung Str 2 kg/s
 1HLB10 CT901 XQ01 S5 T FriLu vor FriLü 1 °C
 1HLA40 CT901 XQ01 S5 T FriLu hi DaLuVo 1 °C
 1HLA50 CT951 XQ01 S5 T HeiLu hi Regen-LuVo 1 °C
 1HLB10 CP901 XQ01 S5 P FriLu vor FriLü 1 mbar
 1HLB10 CP911 XQ01 S5 PD FriLu vor FriLü 1 mbar
 1HLB10 CS901 XQ01 S5 Drz Frischlüfter 1 1/min
 1HLB10 FF901 XQ20 S5 F FriLu vor FriLü1 m3/s
 2HLB10 CT901 XQ01 S5 T FriLu vor FriLü 2 °C
 2HLA40 CT901 XQ01 S5 T FriLu hi DaLuVo 2 °C
 2HLA50 CT951 XQ01 S5 T HeiLu hi Regen-LuVo 2 °C
 2HLB10 CP901 XQ01 S5 P FriLu vor FriLü 2 mbar
 2HLB10 CP911 XQ01 S5 PD FriLu vor FriLü 2 mbar
 2HLB10 CS901 XQ01 S5 Drz Frischlüfter 2 1/min
 2HLB10 FF901 XQ20 S5 F FriLu vor FriLü2 m3/s

Ausgewählte Datenreihen (Symbole ohne Linie) sind im Vergleich mit den Rechenwerten (Linie ohne Symbole) in den Abbildung 27 und Abbildung 28 dargestellt. Um eine Symboldarstellung der Leittechnikdaten zu ermöglichen, wurde die Gesamtdatenmenge auf die Momentanwerte im 10-Sekunden-Raster reduziert.

Für die genannte Zeiträume wurden auch die Protokolle „Schichtbericht Schichtleiter“ angefordert, standen aber leider nicht zur Verfügung, so daß Schalthandlungen nach dem Abfahren des Frischlüfters nicht im Simulationsszenario berücksichtigt werden konnten.

Das Abfahren des/der Frischlüfter erfolgt übergeordnet aus der Funktionsgruppe „Kesselbelüftung“, direkt über das Ausprogramm der Funktionsgruppe „Frisch-

lüfter“ bzw. infolge Ansprechen von Kriterien des Aggregate- oder Kesselschutzes (Störabfahren infolge Schutzauslösung).

Für die Simulation der Frischlüfterabschaltung wurde die ansonsten im Normalbetrieb konstante Frischlüfterdrehzahl im Zeitraum der Abfahrens des Frischlüfters 1 mit einer linearen Rampe approximiert, da dies mit ausreichender Genauigkeit den tatsächlichen Gegebenheiten entspricht.

Zur Bewertung der Simulationsergebnisse kann anhand der Abbildungen festgestellt werden, daß wesentliche Prozeßgrößen in ihrem zeitlichen Verhalten qualitativ richtig abgebildet werden können, auch wenn die Amplituden der Einschwingvorgänge quantitativ nicht vollständig mit den Meßdaten übereinstimmen. Hauptursachen dafür sind:

- die komplette Leittechnik ist z.Z. nicht Bestandteil des erstellten Modells, sondern wird durch Schalt- und Parameterszenarien substituiert;
- d.h., das Wirken der Leittechnik auf Stellglieder und Prozeß wird nur über Szenarien mit direkter Aufprägung ausgewählter Stellgrößen auf den Prozeß abgebildet;
- der Dampferzeuger ist brennkammerseitig gegenwärtig nur über die Schnittstellen der Wärmeströme realisiert sowie als speicherndes Gasvolumen mit definierter Wärmezufuhr.

Für den Frischlüfter 2 betrug die maximale Abweichung des rechnerischen Massenstromes vom tatsächlich an der Anlage gemessenen ca. 5 %. Die bleibende Abweichung im Differenzdruck über Frischlüfter 2 auf Grund nicht ausreichender Informationen für das Simulationsszenario betrug ca. 10 %.

Mit einer Erhöhung der Modellierungstiefe in den genannten Punkten und mit einer weitergehenden Präzisierung einzelner Komponenten ist eine Verbesserung der quantitativen Ergebnisse zu erreichen.

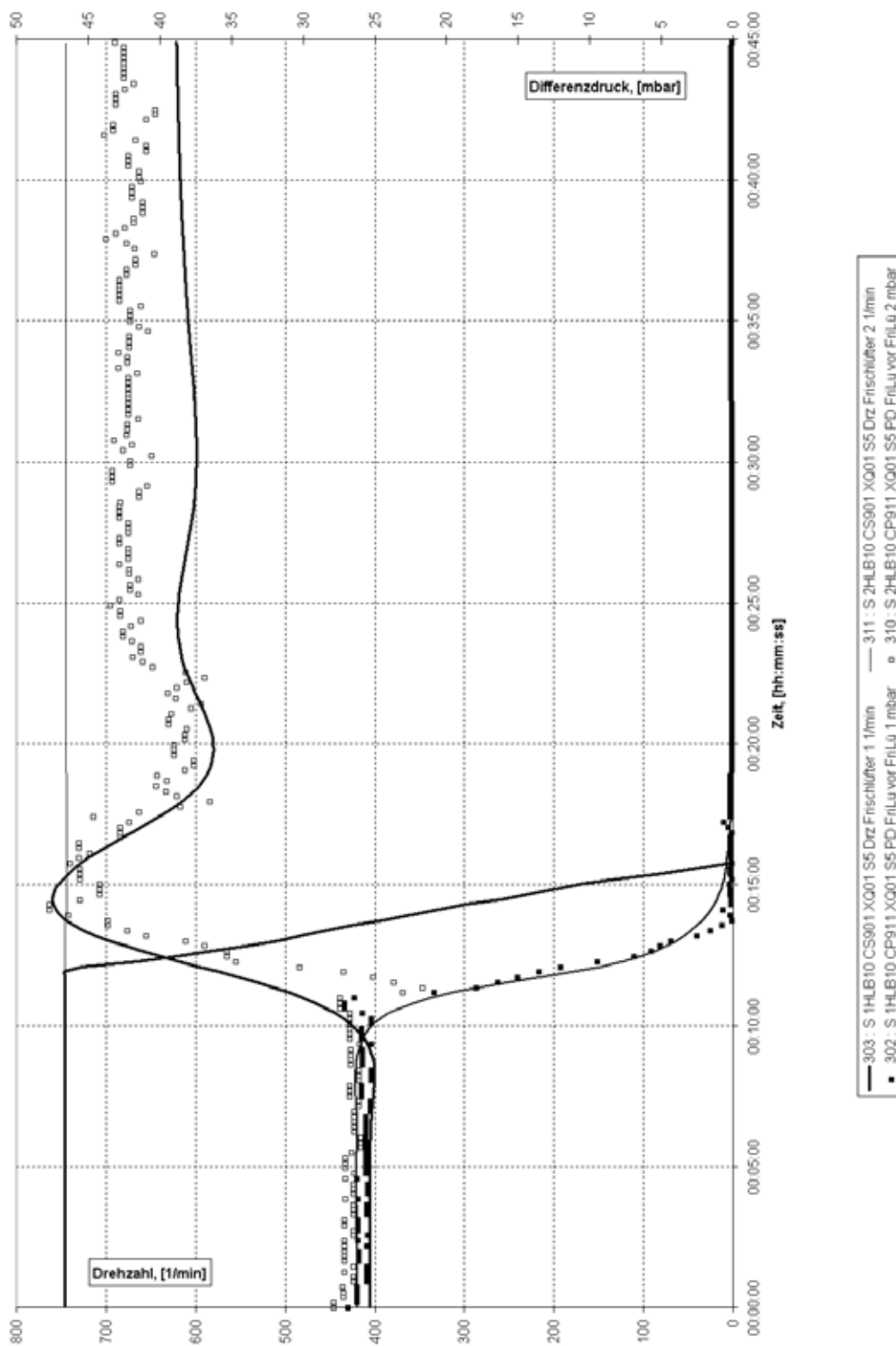


Abbildung 27: Drehzahl der beiden Frischlüfter (Drz Frischlüfter) und Differenzdrücke (PD FriLü)

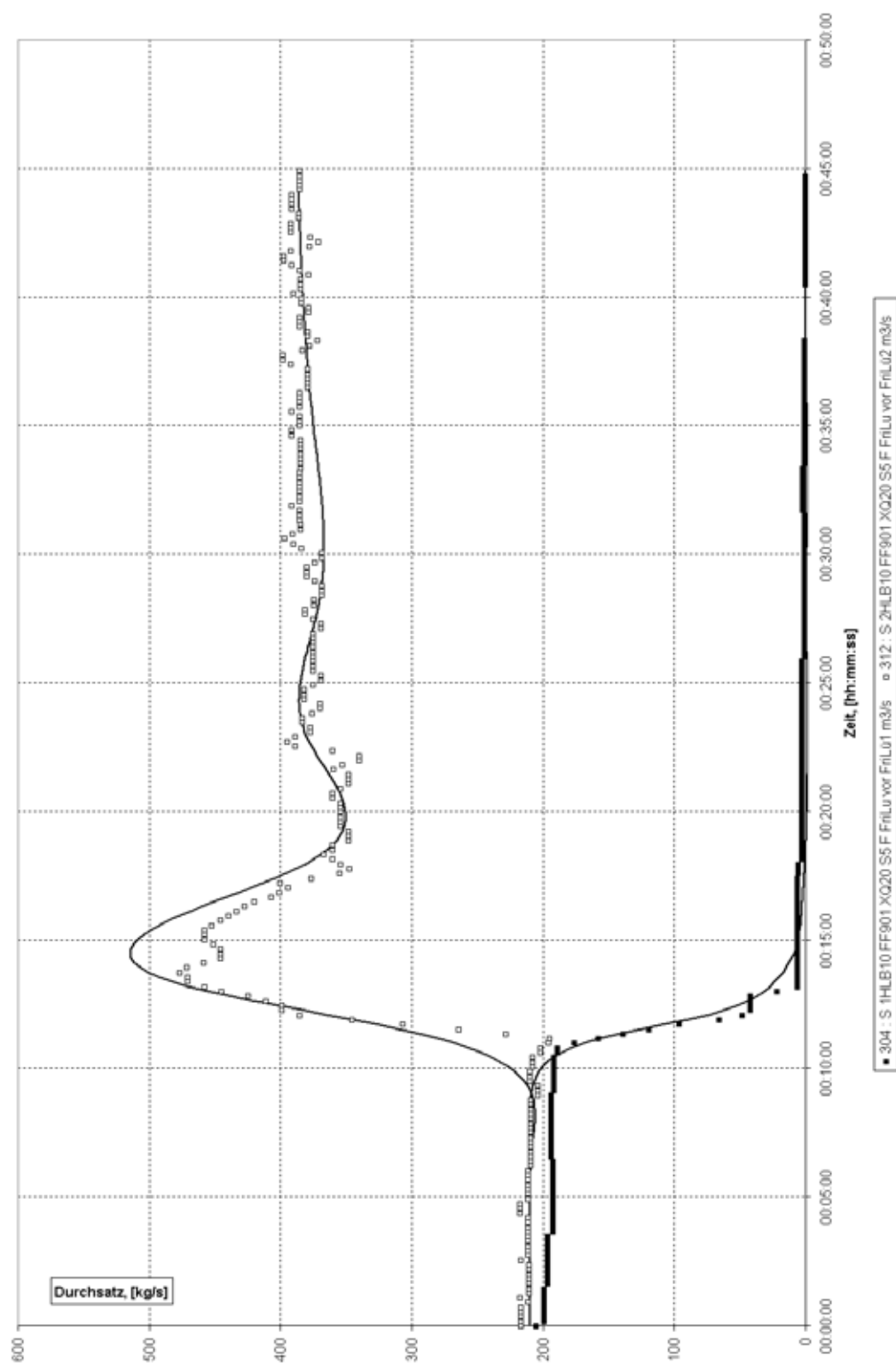


Abbildung 28: Durchsatz der beiden Frischlüfter (F FriLü)

6 Schlußfolgerungen und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurden die methodischen Grundlagen für die Lösung von Aufgabenstellungen auf dem Gebiet der Simulation von dynamischem Verhalten unter der Berücksichtigung der Koppelbarkeit mit einer Verfügbarkeitsmodellierung entwickelt und ausgebaut.

Die Notwendigkeit dafür ergibt sich zum einen aus den zunehmend widersprüchlichen Anforderungen an den Anlageneinsatz, so z.B. Reserveleistungsbereitstellung und Mittellasteinsatz von Grundlastanlagen, sowie zum anderen aus Anpassungsprozessen in Management-, Personal- und Informationsstrukturen der Anlagenbetreiber

Dem entsprechend wurden ein Datenmodell und eine Komponentenbibliothek geschaffen, die Simulation von dynamischem Verhalten und Verfügbarkeit eines Braunkohlenkraftwerksblocks mit einem Modell unter einer Oberfläche erlaubt. Sie ermöglicht die flexible Implementierung unterschiedlicher Kraftwerksschaltungen und wechselnder Randbedingungen, wodurch eine hohe Anwendungsbreite erreicht wird.

Nach eingehender Prüfung der Anwendbarkeit moderner Software-Werkzeuge wurde entschieden, das Programmpaket 'Matlab/Simulink' einzusetzen.

In der dafür entwickelten Simulationsbibliothek wurden wesentliche Elemente großer braunkohlegefeuerter Kraftwerke unterschiedlichster Schaltung modelliert. Ein solches Modell ermöglicht sowohl die Simulation des zeitlichen Parameter- und Leistungsverlaufes z.B. bei Komponentenausfall als auch die Ankopplung der Simulation von Verfügbarkeitsauswirkungen über Bilanzzeiträume, wobei die Komponentenstruktur und die technologischen Grunddaten des Gesamtmodells für beide Teilmodelle genutzt werden. Zusätzlich können die Ergebnisse der Parametersimulation in Form von Leistungsbeschränkungen in die Verfügbarkeitssimulation einfließen.

Das erstellte Modell bildet den Kraftwerksblock in seinen wesentlichen Komponenten ab und ermöglicht damit eine Simulation der wichtigsten Ereignisse. Einschränkungen wurden entsprechend den zur Verfügung stehenden Ressourcen gemacht, um trotzdem ein in wesentlichen Aspekten anwendbares Modell zu

erhalten. So wurden zum Beispiel der Rauchgasentschwefelungsprozeß und die Entstickung nur als Bilanzvolumina erfaßt, da ansonsten hierzu komplexe chemische Gleichgewichte zu berechnen sind, die den Rahmen dieser Arbeit gesprengt hätten. Weiterhin wurden Teile des Kraftwerkes nur durch quasistationäre Gleichungen beschrieben, da es sich entweder um Prozesse mit sehr großen Zeitkonstanten handelte oder aber um Prozesse der Gasdynamik mit sehr kleinen Zeitkonstanten. Dabei sind die Prozesse mit großen Zeitkonstanten uninteressant für die wesentlichen Vorgänge, die mit sehr kleinen sind äußerst schwierig zu modellieren. Eine weitere Einschränkung betrifft die implementierten Regler und Steuerungen: Sie sind nur insoweit verwirklicht, wie sie für den Normalbetrieb und die betrachteten Szenarien benötigt werden.

Trotz der genannten Einschränkungen ist die erstellte Komponentenbibliothek aufgrund ihres modularen Aufbaus universell und kann jederzeit weiter detailliert und ergänzt werden. So ist z.B. die Modellerweiterung auf periphere Prozesse sowie Berücksichtigung deren Speichervermögens im Rahmen gekoppelten von Prozeß- und Verfügbarkeitsuntersuchungen (z.B. Bunker, Fördereinrichtungen, Armaturen) möglich. Dies eröffnet dem Anwender die Möglichkeiten, Untersuchungen zur anlagentechnisch teilweise stark redundanten Ver- und Entsorgung vorzunehmen.

Die Einsatzmöglichkeiten der nun vorliegenden Komponentenbibliothek wurden an zwei technologisch sehr unterschiedlichen Kraftwerksschaltungen demonstriert.

Zum Einen erfolgte Modellanwendung und Modellvalidierung für eine trockenbraunkohlegefeuerte Gas- und Dampf-Anlage mit zweiwelliger Gasturbine und stationärem Druckwirbelschichtdampferzeuger. Die Besonderheit besteht hier in der Implementierung sehr spezifischer Teilmodelle für Gasturbine und Wirbelschichtfeuerung.

Zum Anderen erfolgte Modellanwendung und Modellvalidierung für ein rohbraunkohlegefeuertes Kondensationskraftwerk großer Leistung. Hier bestand die Besonderheit darin, daß auf Grund der integrierten Modellierung von Prozeßdynamik sowie Zeit- / Arbeitsverfügbarkeit unter Berücksichtigung der Nebenan-

lagen in der Ver- und Entsorgung eine sehr hohe Komponentenzahl und ausgeprägte Modellhierarchie über mehrere Ebenen mit sich brachte.

Durch diese beiden Anwendungsfälle konnte gezeigt werden, daß die nun vorliegende Komponenten-Bibliothek mit der entwickelten Modellierungsmethodik und dem dazugehörigen Datenmodell für eine sehr breite Klasse unterschiedlichster Kraftwerksschaltungen geeignet ist. Auch zeigen die vorgelegten Validierungsergebnisse, daß die Komponenten-Bibliothek die in sie gestellten Erwartungen erfüllt.

7 Literatur

- [1] Baehr, H.D.; Diederichsen, C.: Berechnungsgleichungen für Enthalpie und Entropie der Komponenten von Luft und Verbrennungsgasen.- Brennst.-Wärme-Kraft 40 (1988) 1/2, S. 30 - 33.
- [2] Bertsche, B.; Lechner, G.: Zuverlässigkeit im Maschinenbau – Ermittlung von bauteil- und System-Zuverlässigkeiten.- Springer, Berlin (1990).
- [3] Brandt, F.: Wärmeübertragung in Dampferzeugern und Wärmeaustauschern.- Essen, Vulkan-Verlag (1995).
- [4] Döring, M.: Simulation des Auskühlvorgangs in Dampferzeugern.- Düsseldorf: Fortschr.-Ber. VDI, Reihe 6 (1997) 353.
- [5] Dymek, Th.: Modulares und bedienerfreundliches Rechenprogramm für die Kraftwerksdynamik.- Aachen (1991).
- [6] Franke, J.; Eitelberg, E.; Kallina, G.; Weber, H.; Witte, U.: Vorausberechnung des dynamischen Verhaltens eines Kraftwerksblockes.- VGB Kraftwerkstechnik 59 (1979) 2, S. 124 – 128.
- [7] Franke, J.: Untersuchung der hydrodynamischen Stabilität von Verdampferheizflächen mit Hilfe nichtlinearer Simulationen.- Darmstadt (1986).
- [8] Gebhardt, A.: Rechnerische Simulation des instationären Teillastverhaltens konventioneller Kraftwerksblöcke.- Aachen (1986).
- [9] Hannemann, F.; Karg, J.; Koch, I.: Dynamische Simulation als Werkzeug der Systemtechnik am Beispiel des IGCC-Kraftwerks Puertollano.- Düsseldorf: VDI-Berichte, 1495 (1999) S. 481 - 492.
- [10] Hönig, O.: Untersuchung des dynamischen Verhaltens eines konvektiv beheizten Naturumlauf-Dampferzeugers mit einem mathematischen Modell.- Braunschweig (1979).
- [11] IAPWS-IF 97 - Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam.- Palo Alto CA, EPRI (1997).

- [12] IFC-1967 Formulation for Industrial Use.- Intern. Formulation Committee of the 6th Conference on the Properties of Steam, New York, ASME (1967).
- [13] Kafka, P.: Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit großtechnischer Systeme.- VDI-Bildungswerk, Düsseldorf (1998).
- [14] Kakac, S. (Ed.): Boilers, Evaporators and Condensers.- John Wiley & Sons, N.Y. (1991).
- [15] Kammer, G.v.d.: Optimierung des Anfahrverhaltens von Zwangsdurchlaufdampferzeugern mit einem mathematisch-physikalischen Modell.- Braunschweig (1977).
- [16] Kley, J.: Anwendung und experimentelle Überprüfung der Simulation mit semianalytischer Lösungsmethode an einem Zwangsdurchlaufdampferzeuger mit überlagertem Umlauf.- Stuttgart (1982).
- [17] Klose, E.; Kuchling, T.; Born, M.: Brennstofftechnische Arbeitsmappe.- Bergakademie Freiberg, Sektion Verfahrens- und Silikattechnik (1988 ff.).
- [18] Koch, I.; Hannemann, F.; Hoffmann, U.: Dynamische Simulation stationärer Verdampfungsvorgänge in Wärmetauschern.- Chem.-Ing.-Techn. 71 (1999) 10, S. 1150 - 1153.
- [19] Kretzschmar, H.-J.; Stöcker, I.: Stoffwertprogramme für die neue Industrie-Formulation IAPWS-IF97 von Wasser und Wasserdampf.- Hochschule (FH) Zittau (1998).
- [20] Lu, S.: Dynamic modelling and simulation of power plant systems.- Proc. Instn Mech. Engrs, Part A (Journal of Power and Energy), 213 (1999) 1, pp. 7 - 22.
- [21] McBride, B.J.; Heibel, S.; Ehlers, J.G.; Gordon, S.: Thermodynamic Properties to 6000 K for 210 Substances involving the First 18 Elements (NASA SP-3001, N63-23715).- US Dep. of Commerce, Washington D.C. (1963).

- [22] McCormick, N.J.: Reliability and Risk Analysis Methods and Nuclear Power Applications.- Academic Press (1981).
- [23] Petermann, H.: Einführung in die Strömungsmaschinen.- Springer (1988).
- [24] Procaccia, H.; Arsenis, S.P.; Aufort, P.: EIReDA – European Industry Reliability Data Bank.- Crete Univ. Press (1998).
- [25] Richter, F.: Physikalische Eigenschaften von Stählen und ihre Temperaturabhängigkeit.- Düsseldorf, Verlag Stahleisen: Mitt. Forsch.-Inst. Mannesmann AG (1983).
- [26] Rohse, H.: Untersuchungen der Vorgänge beim Übergang vom Umwälz- zum Zwangsdurchlaufbetrieb mit einer dynamischen Dampferzeugersimulation.- Düsseldorf: Fortschr.-Ber. VDI, Reihe 6 (1995) 327.
- [27] Rolf; A.: Simulation des nichtlinearen, dynamischen Verhaltens von Wärmetauschern sowie ihrer komplexen Schaltungen im Kraftwerksbau mit einem semianalytischen Berechnungsverfahren.- Stuttgart (1983).
- [28] Rukes, B., Weber, I., Kruse, A., Wagner, W.: Erste Erfahrungen mit der IAPWS- IF 97.- Brennst.-Wärme-Kraft 51 (1999) 3, S. 30-36.
- [29] Schäfke, B.: Beitrag zur dynamischen Simulation von Kühlkreisen mit drehzahlvariablen Pumpenantrieben.- Fortschr.-Ber. VDI, Reihe 19 (1986) 3.
- [30] Schemenau, W.; Schoedel, J.: Fortschrittliche Kohlekraftwerke, Entwicklungstrends.- BWK 41 (1989) 7/8, S. 323 – 327.
- [31] Schemenau, W.: Druckwirbelschicht – fortschrittliche Kohleverstromung mit Betriebserfahrungen.- BWK 45 (1993) ½, S. 23 – 26.
- [32] Schumacher, U.: Über das instationäre Verhalten des Wasser-Dampfsystems eines Heizkraftwerkes.- Aachen (1989).
- [33] Shang, T.-L.: A dynamic model of once-through supercritical pressure boiler.- Zürich (1971).
- [34] Stamatelopoulos, G.-N.: Berechnung und Optimierung von Kraftwerkskreisläufen.- Düsseldorf: Fortschr.-Ber. VDI, Reihe 6 (1996) 340.

- [35] Stodola, A.: Dampf- und Gasturbinen.- Springer (1924).
- [36] Traupel, W.: Thermische Turbomaschinen.- Springer (1977/1982).
- [37] Vesely, W.E.; Goldberg, F.F.; Roberts, N.H.; Haase, D.F.: Fault Tree Handbook.- NUREG (1981).
- [38] Volkov, N.P.; Leonkov, A.M.; Kacan, A.D.: Untersuchung des Verhaltens von Turbinenstufengruppen bei wechselnden Betriebsverhältnissen.- Izv.vyss.ucebn.zaved., Energetika, Minsk 12 (1969) 7, S. 45 – 51.
- [39] Waloch, M.: Anlagenstörfalldynamik von Hochtemperaturreaktoren mit direktem Gasturbinenkreislauf.- Aachen (1979).
- [40] Wienand, F.; Rake, H.; Thierbach, H.; Dynamische Simulation von Störfällen in den Frischluft- und Rauchgaswegen eines Braunkohlenkraftwerkes.- Fortschritte in der Simulationstechnik, Band 9 (1994) S. 683 - 688.
- [41] Zehner, P.: Vier-Quadranten-Charakteristiken mehrstufiger axialer Turbinen.- Düsseldorf: Fortschr.-Ber. VDI, Reihe 6 (1980) 75.

8 Anhang

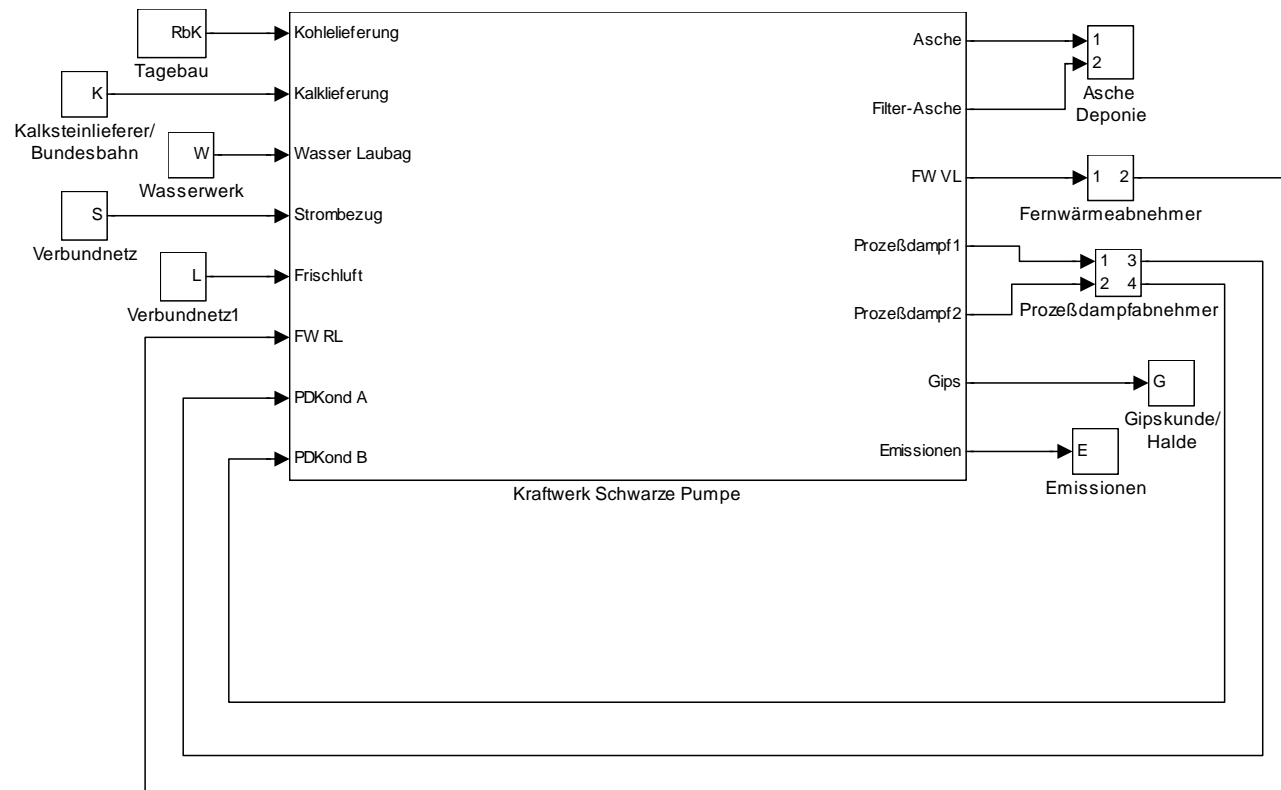


Abbildung 29: Das Kraftwerk – Übersichtsbild

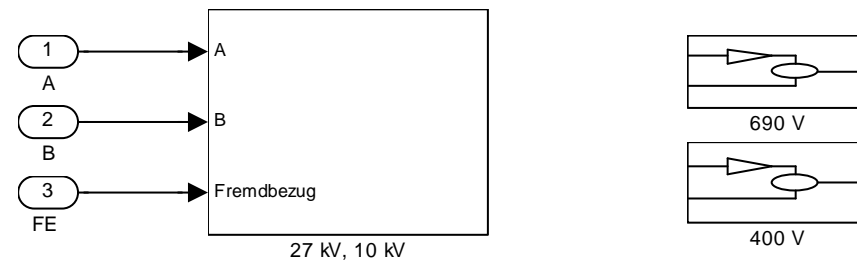


Abbildung 31: Elektro-Schiene

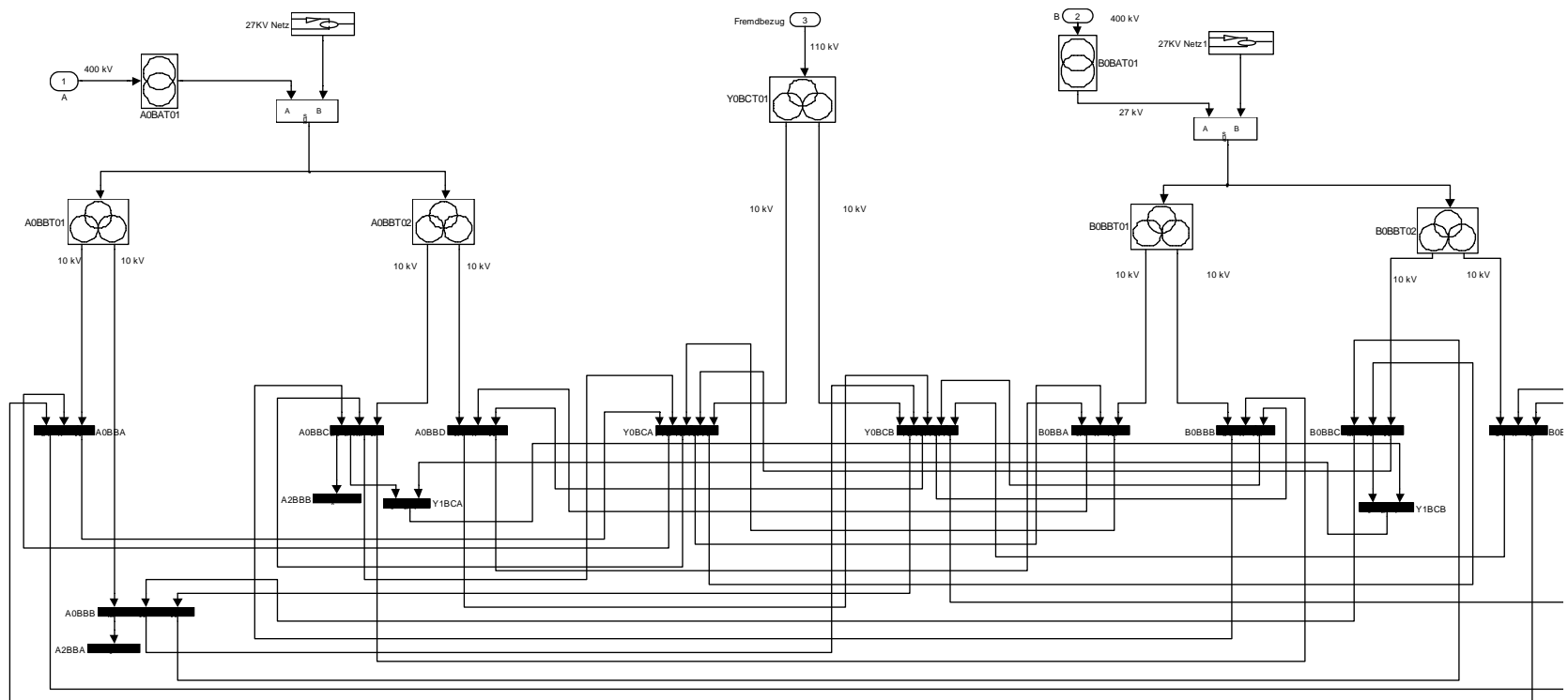


Abbildung 32: 27 kV und 10 kV-Schienen

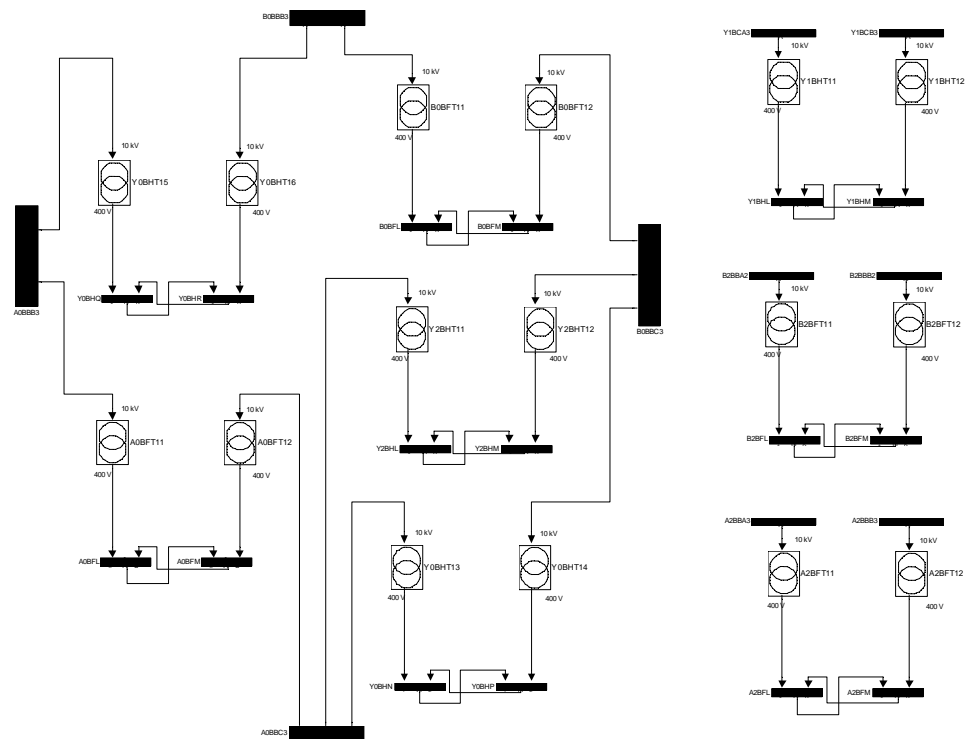


Abbildung 34: 10 kV - und 400 V - Schienen

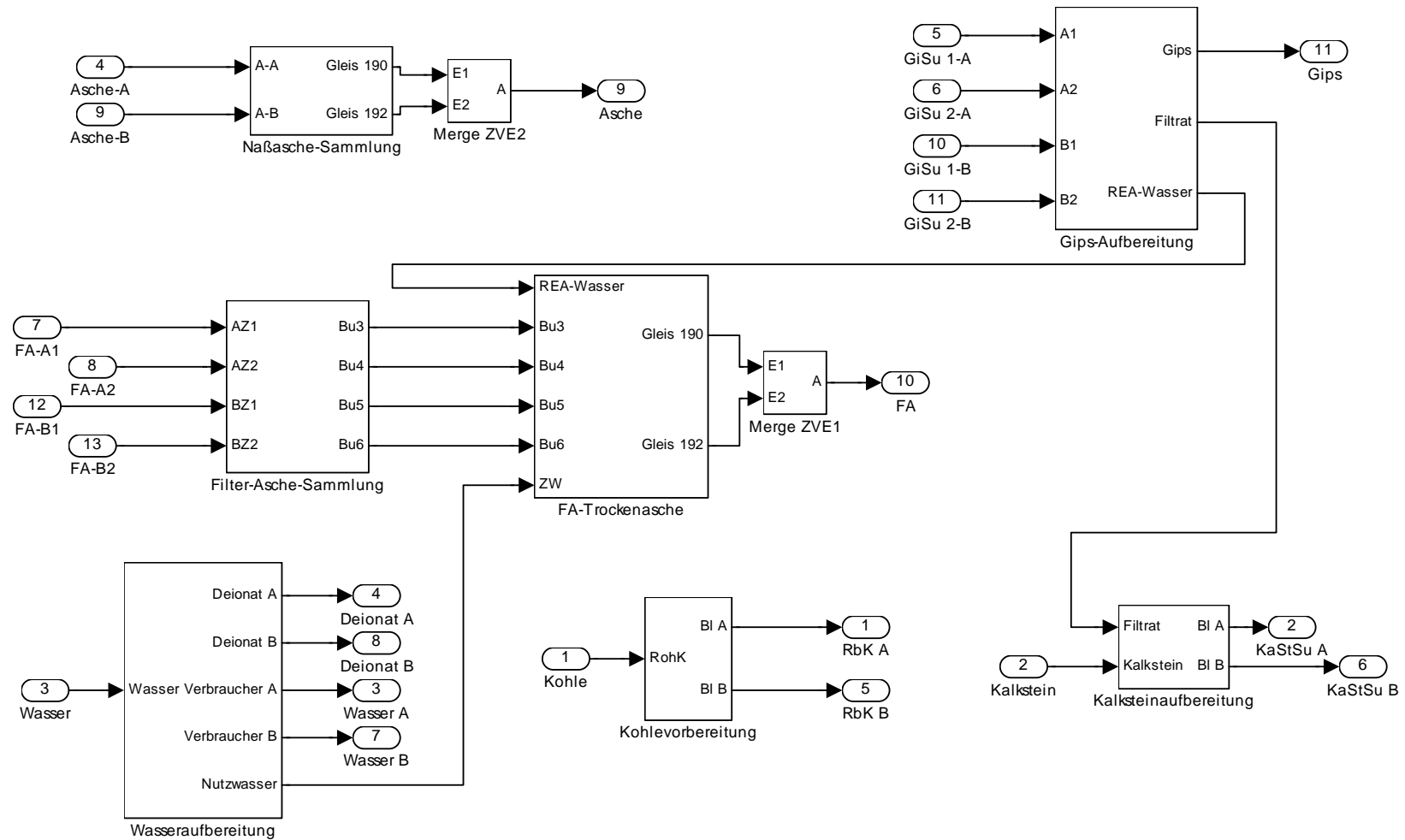


Abbildung 35: Zentrale Ver- und Entsorgung

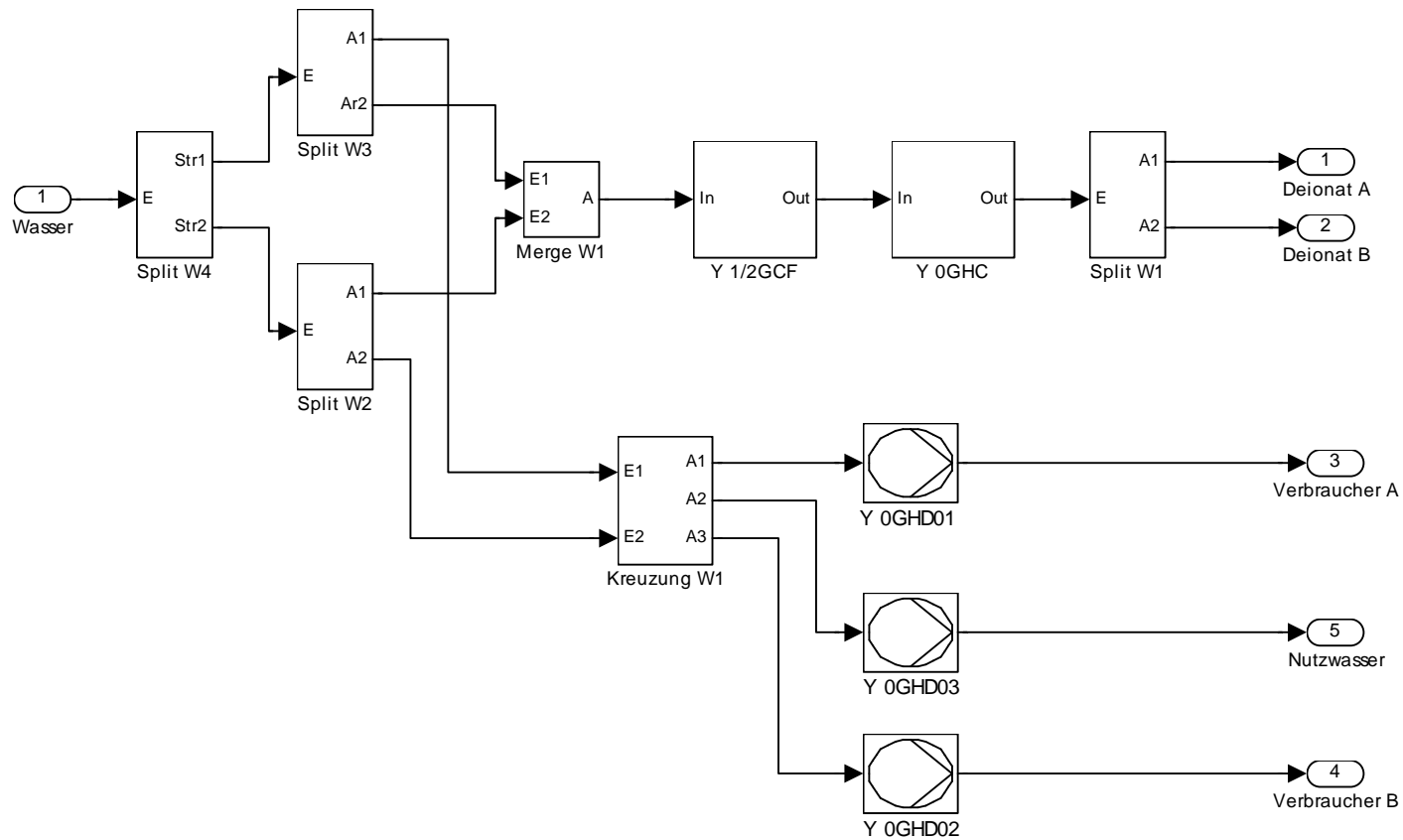


Abbildung 36: Wasseraufbereitung

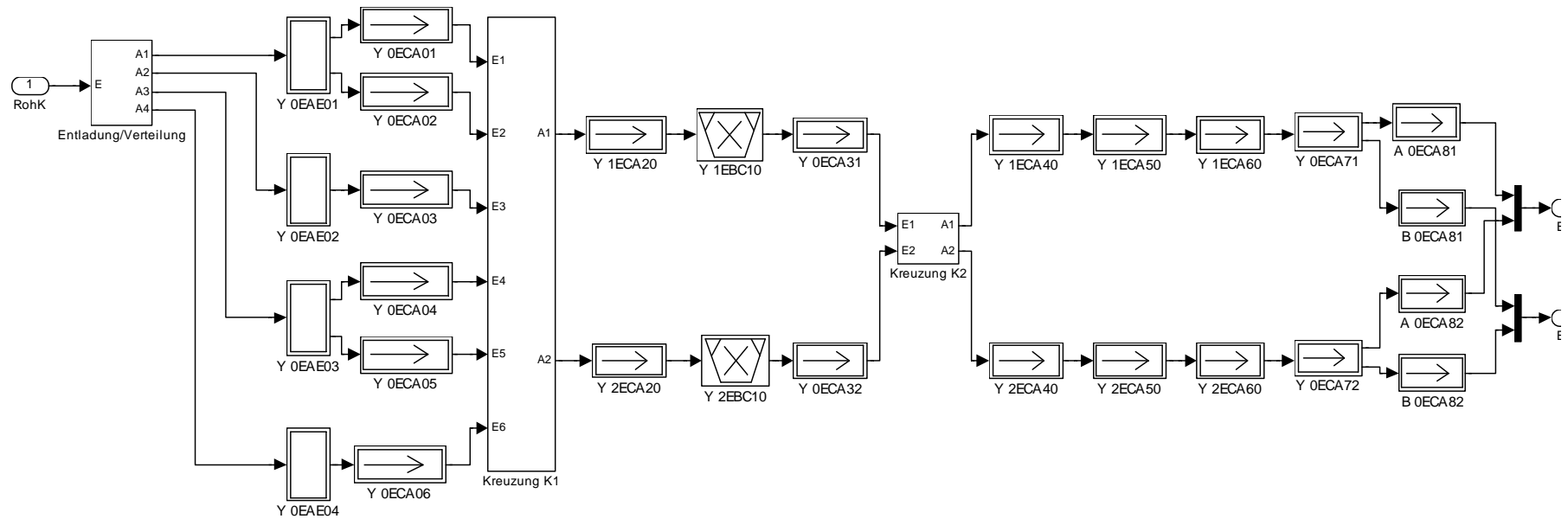


Abbildung 37: Kohlevorbereitung

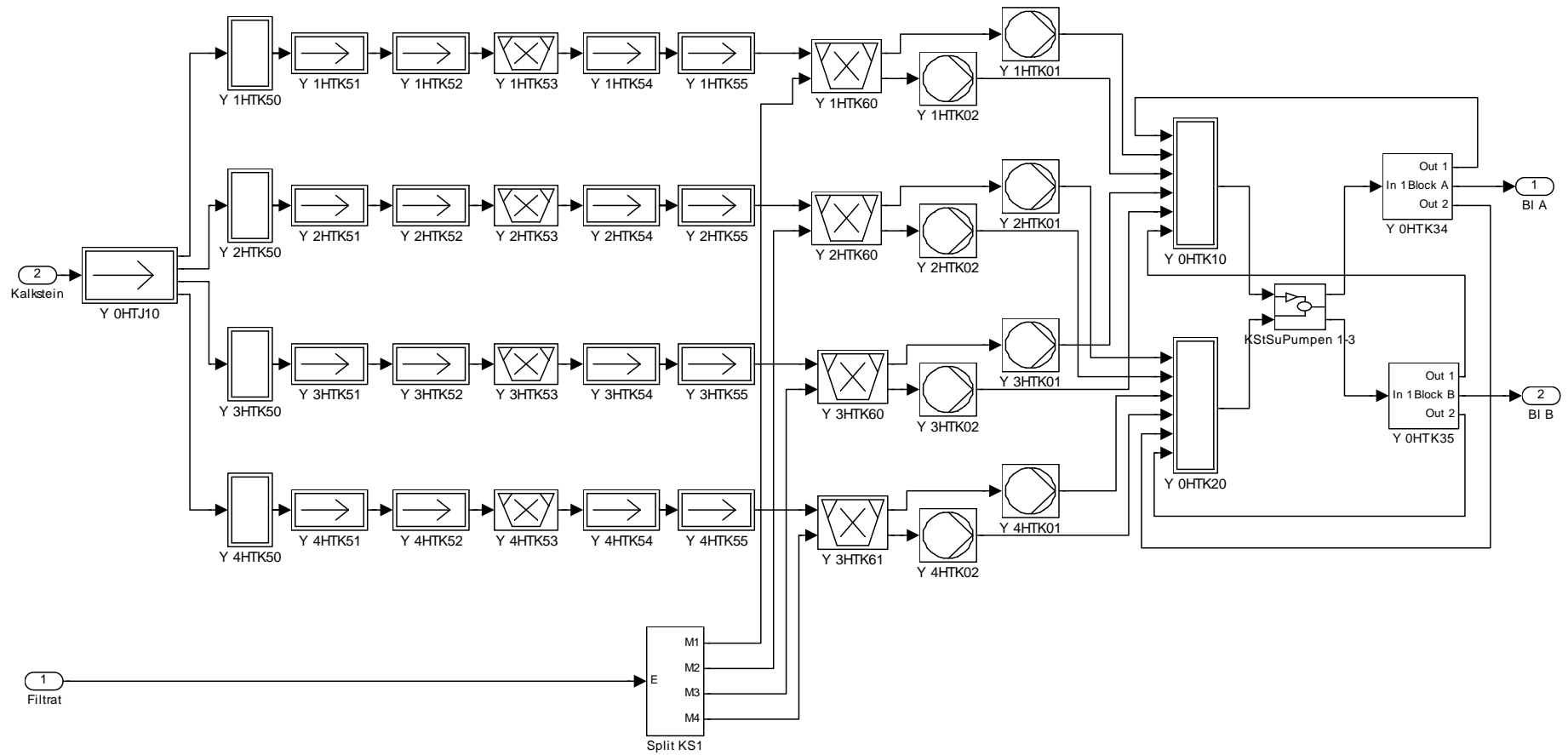


Abbildung 38: Kalksteinaufbereitung

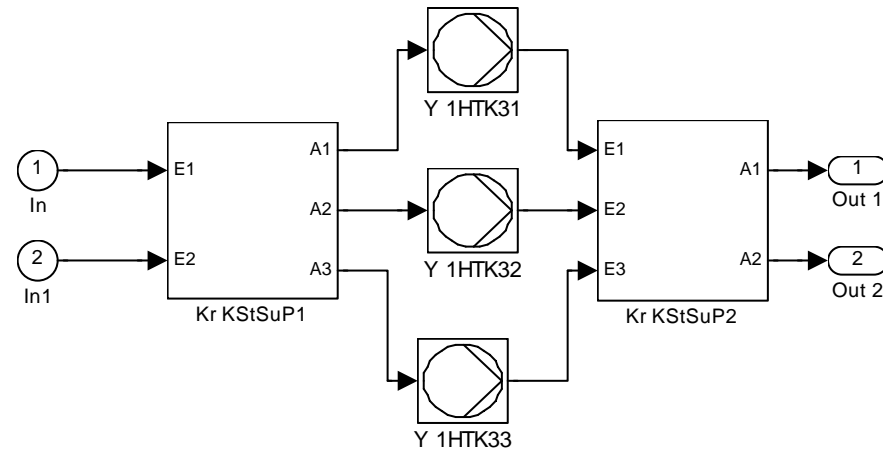


Abbildung 39: Kalksteinsuspensionspumpen

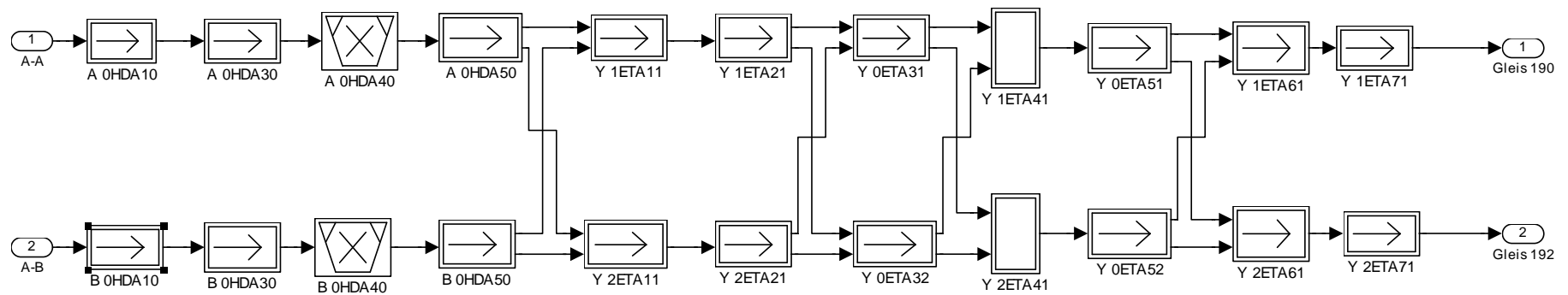


Abbildung 40: Nassaschesammlung

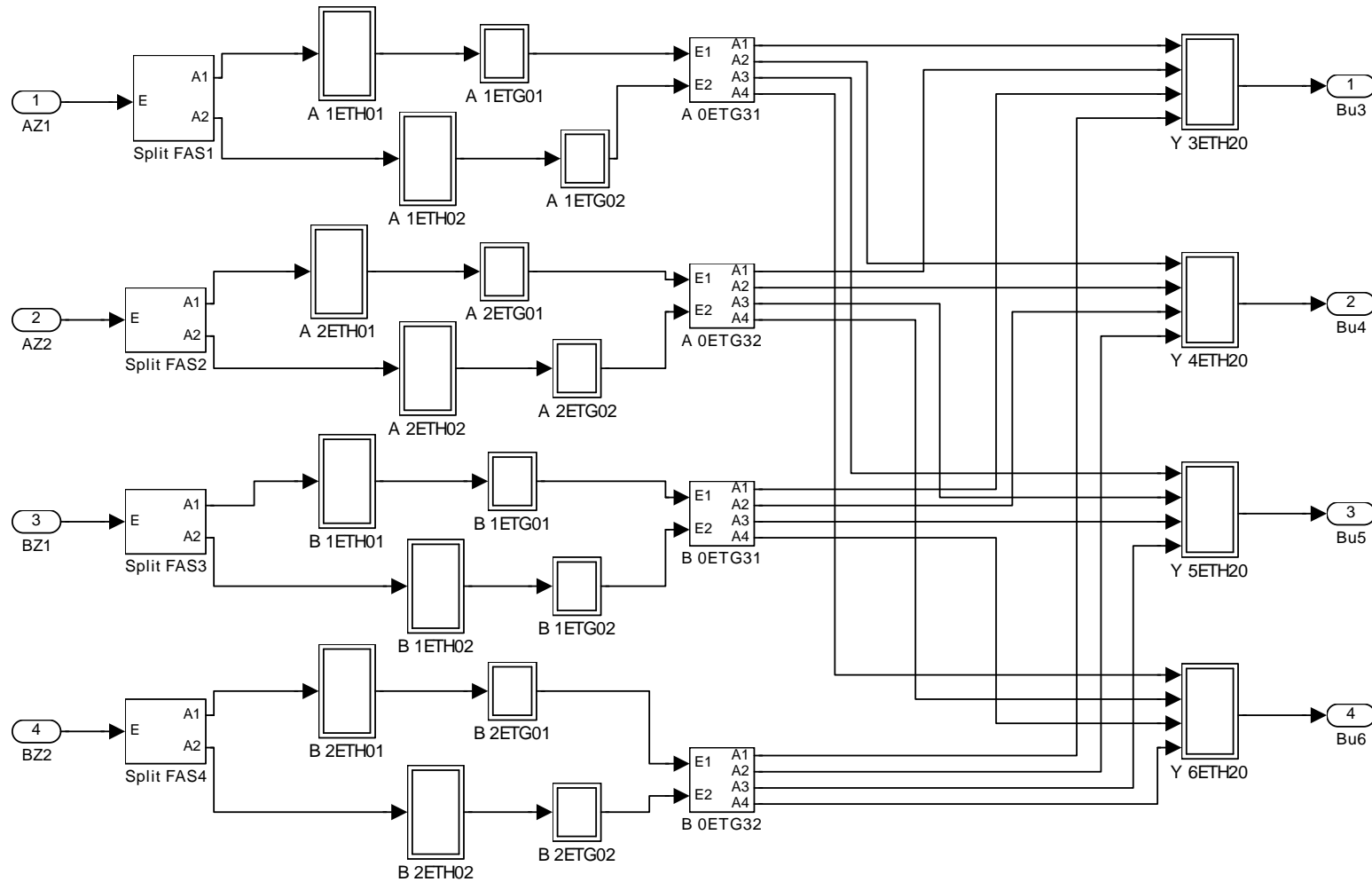


Abbildung 41: Filteraschesammlung

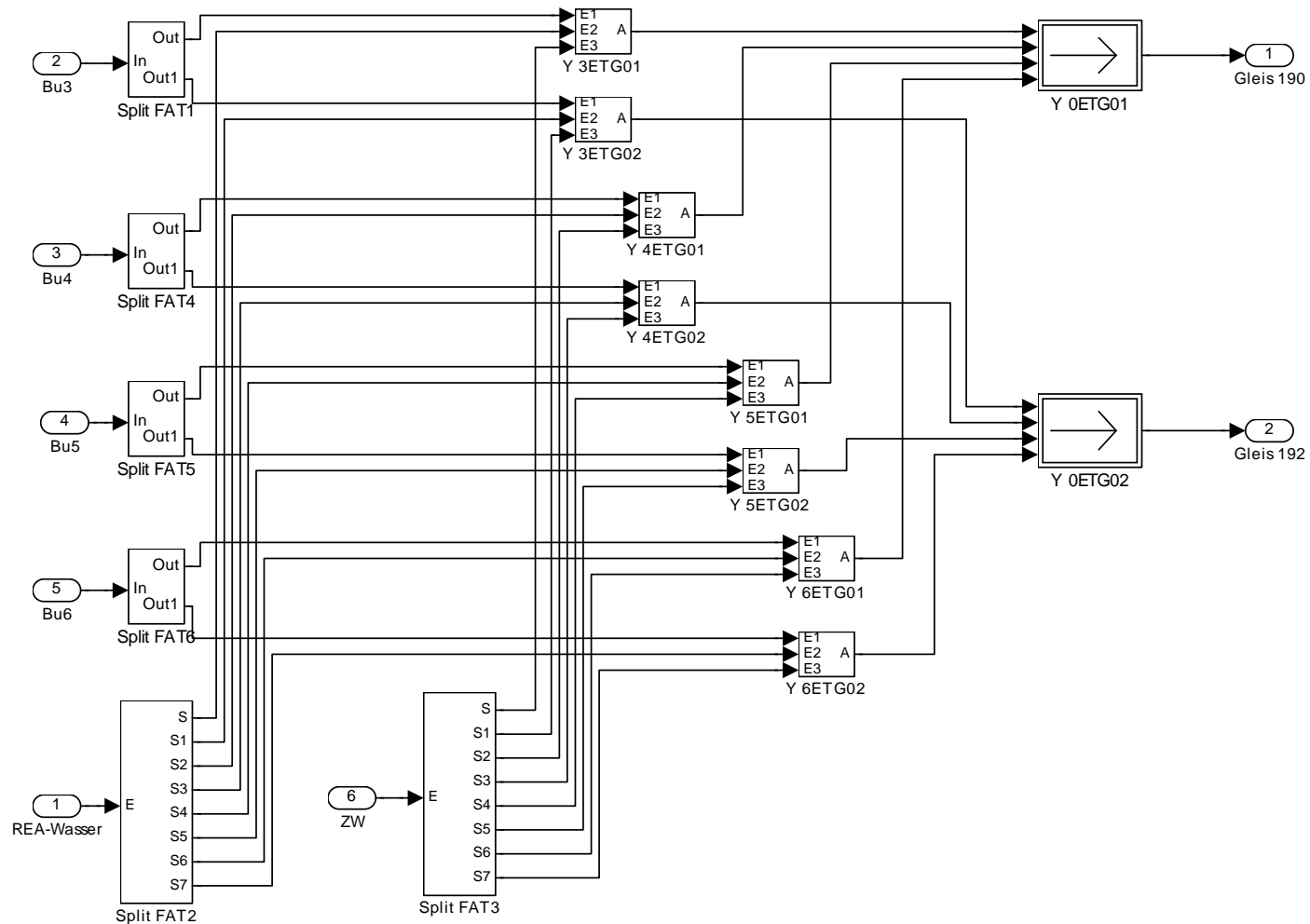


Abbildung 42: Filterasche- (Trockenasche-) verladung

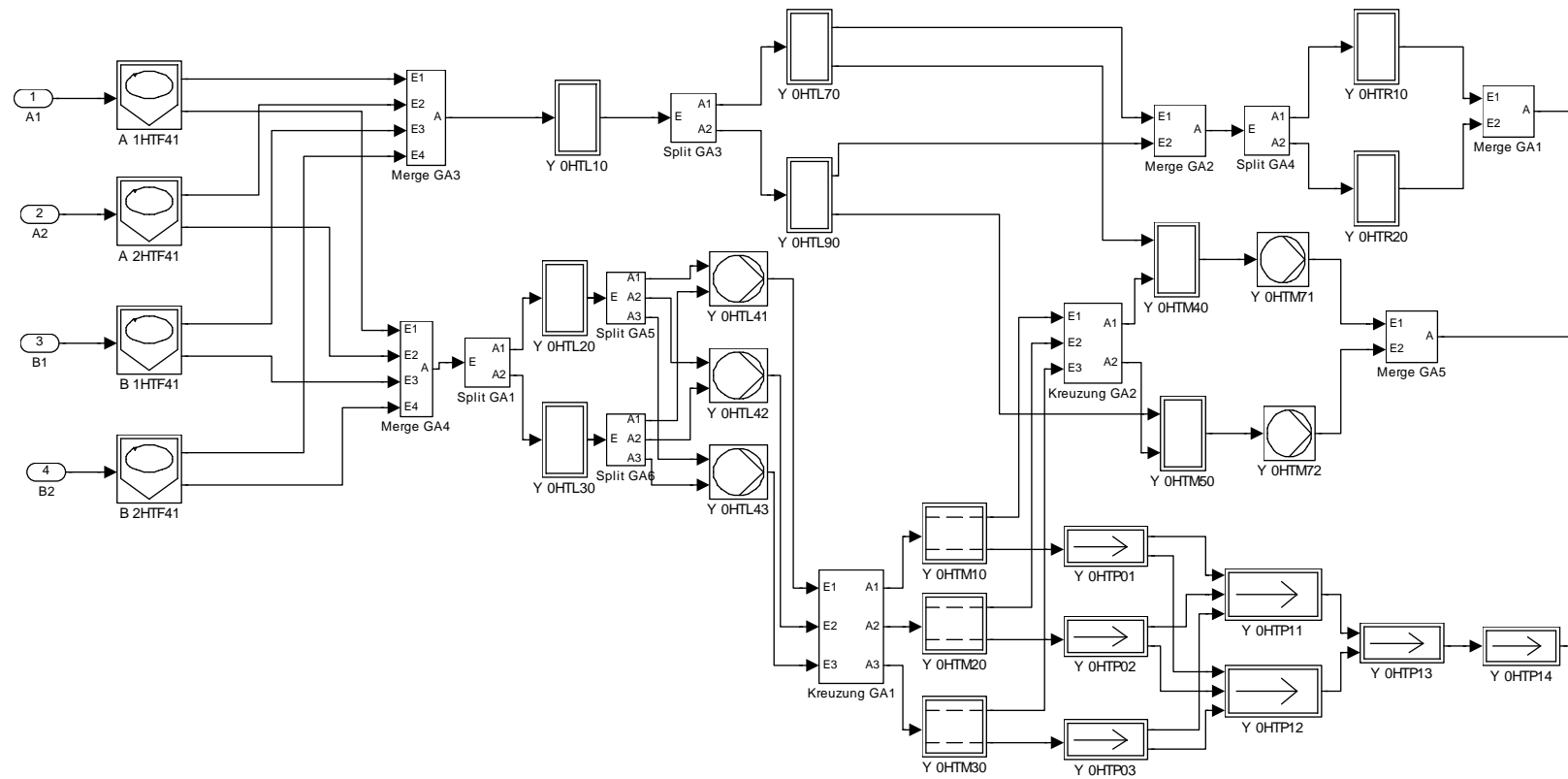


Abbildung 43: Gipsaufbereitung

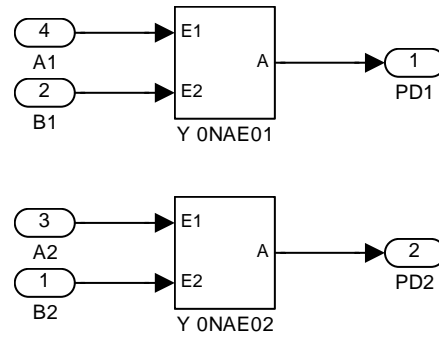


Abbildung 44: Prozessdampf-Schiene

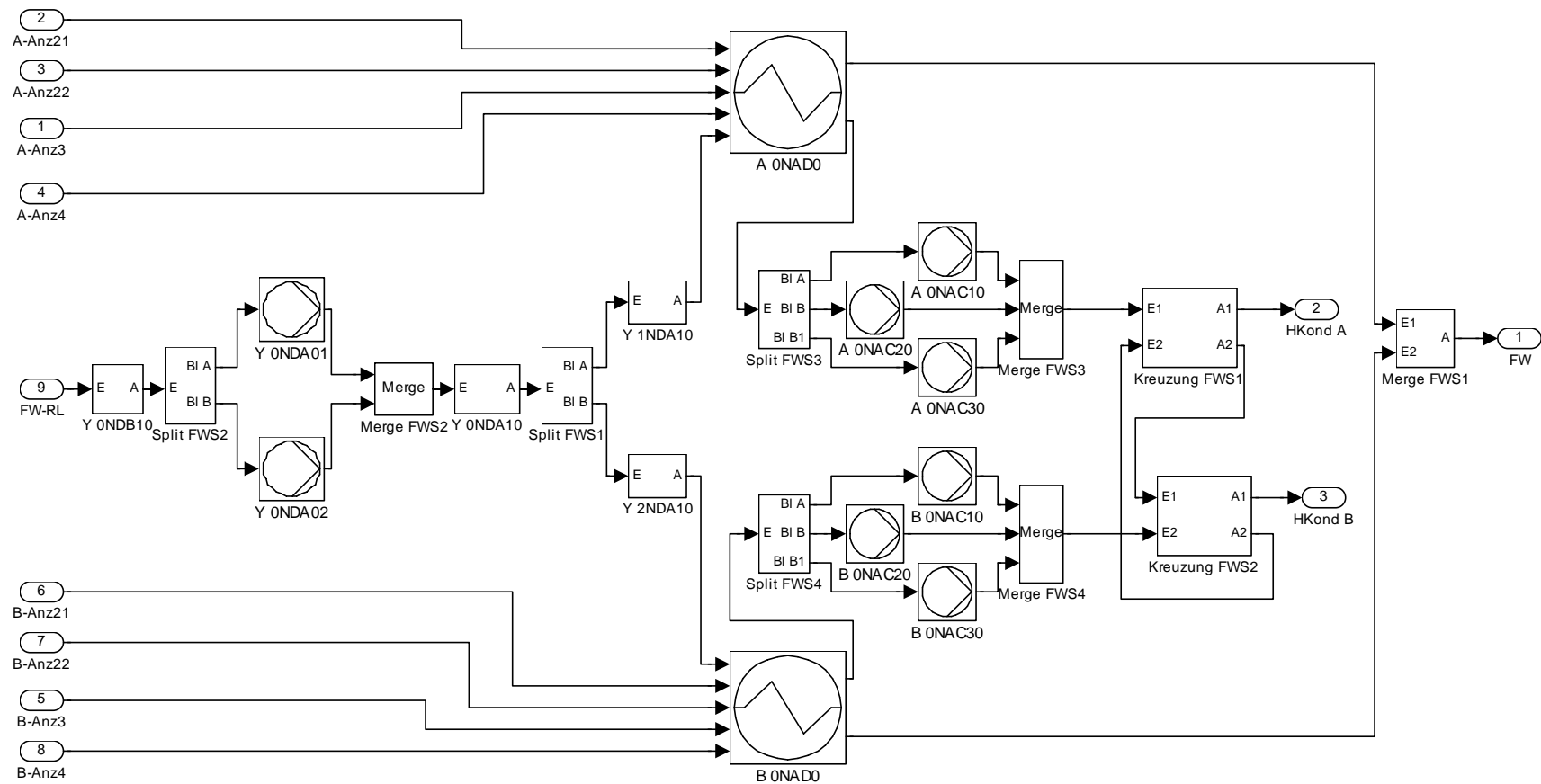


Abbildung 45: Fernwärme-Schiene

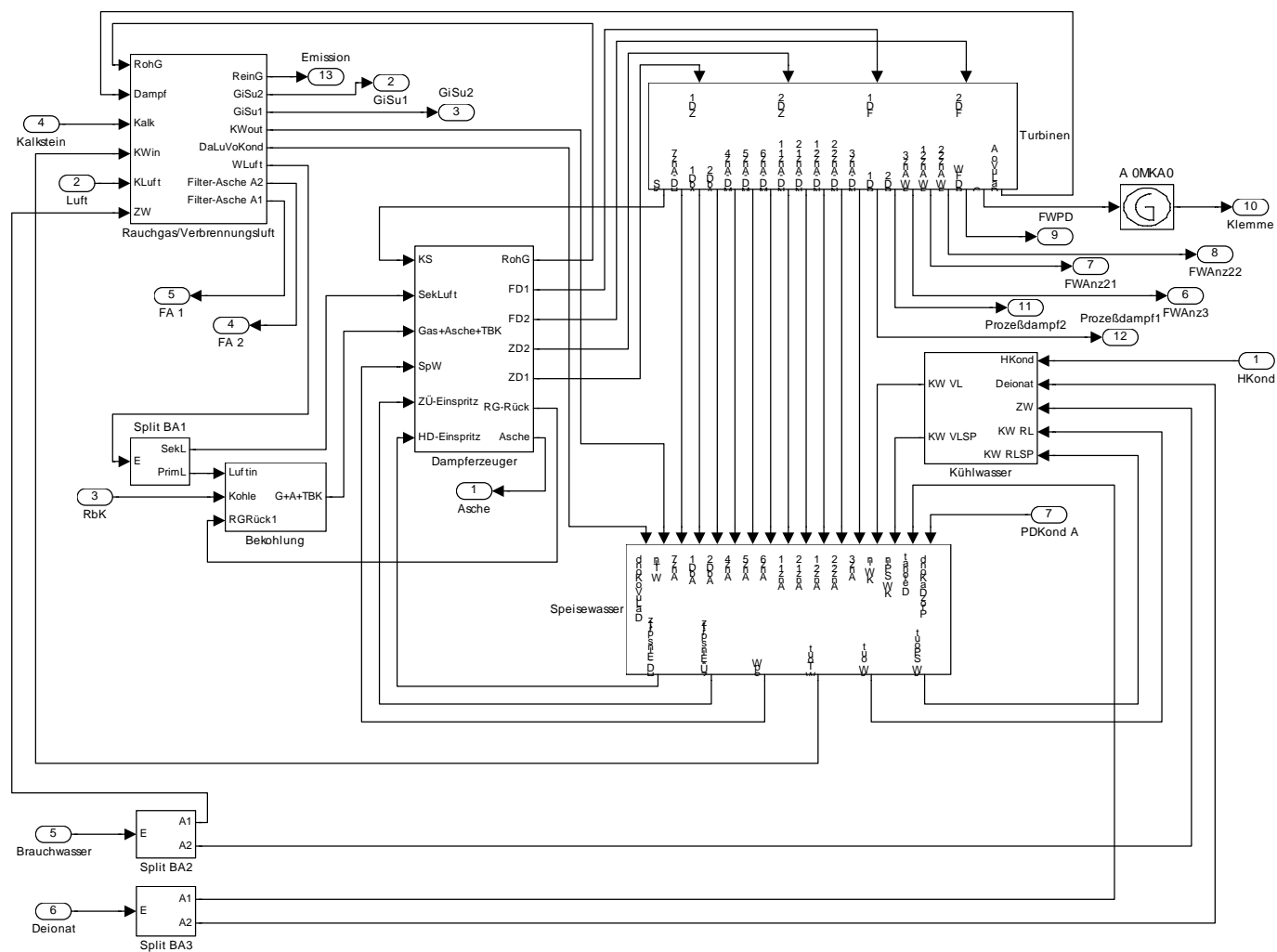


Abbildung 46: Block A

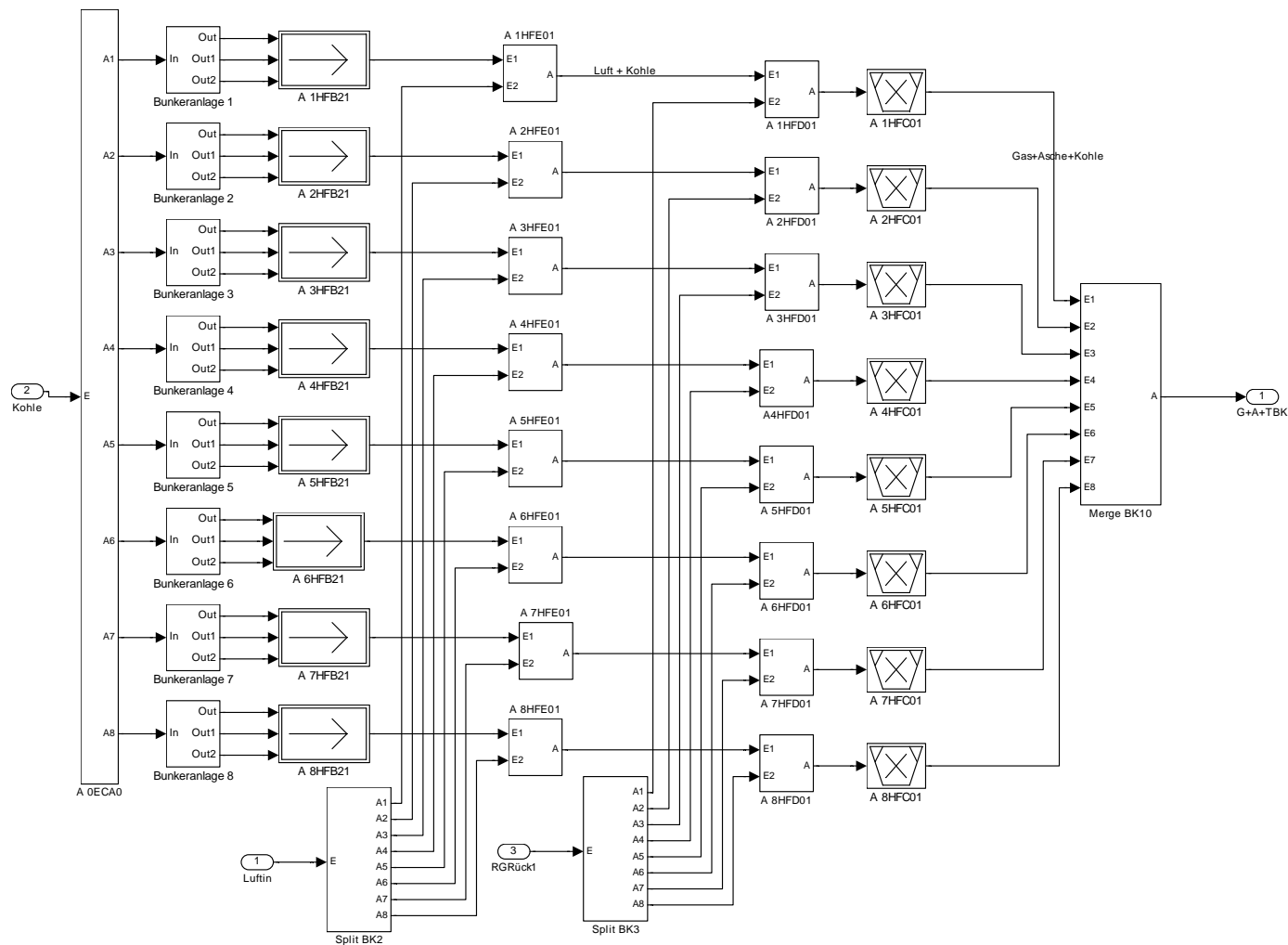


Abbildung 47: Bekohlung

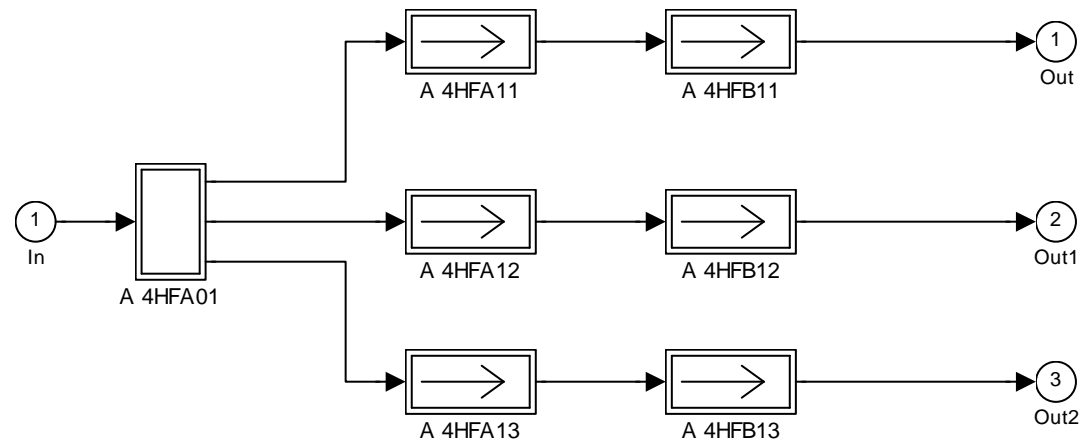


Abbildung 48: Bunker 4 mit Austragsystem

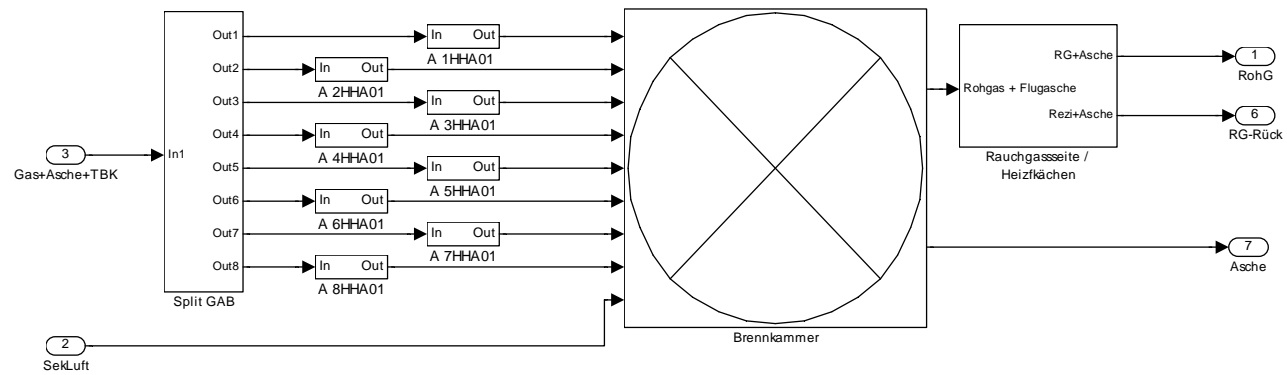
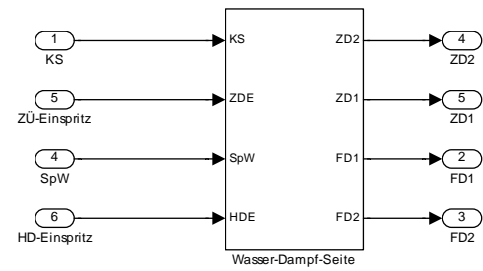


Abbildung 49: Dampferzeuger

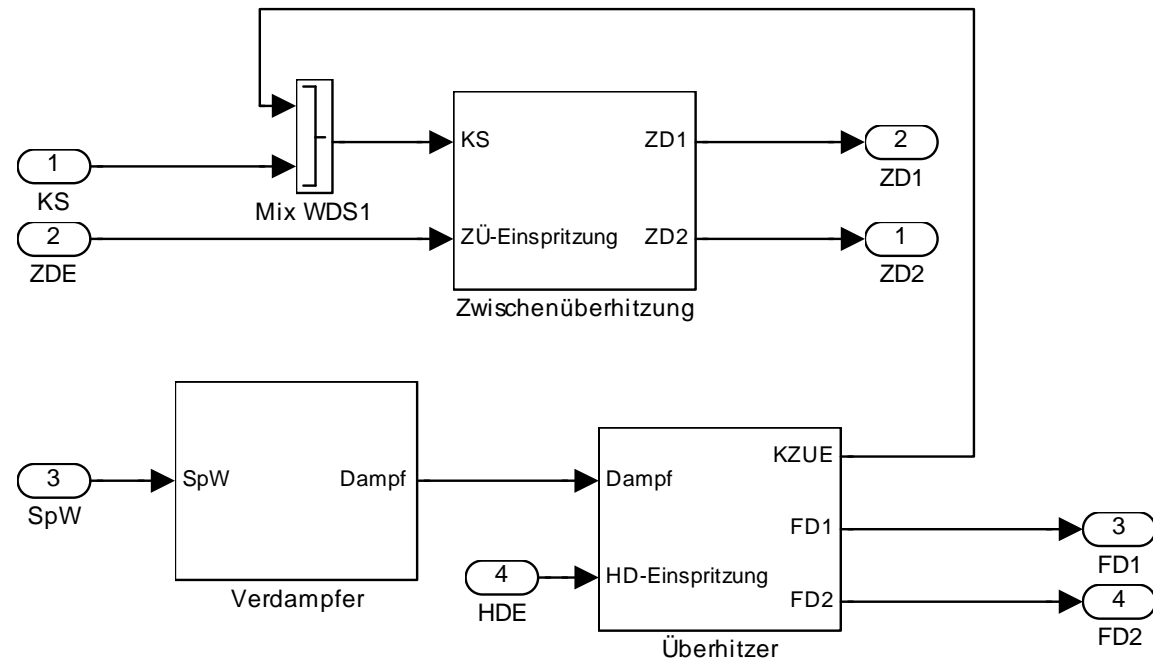


Abbildung 50: Wasser-Dampf-Seite

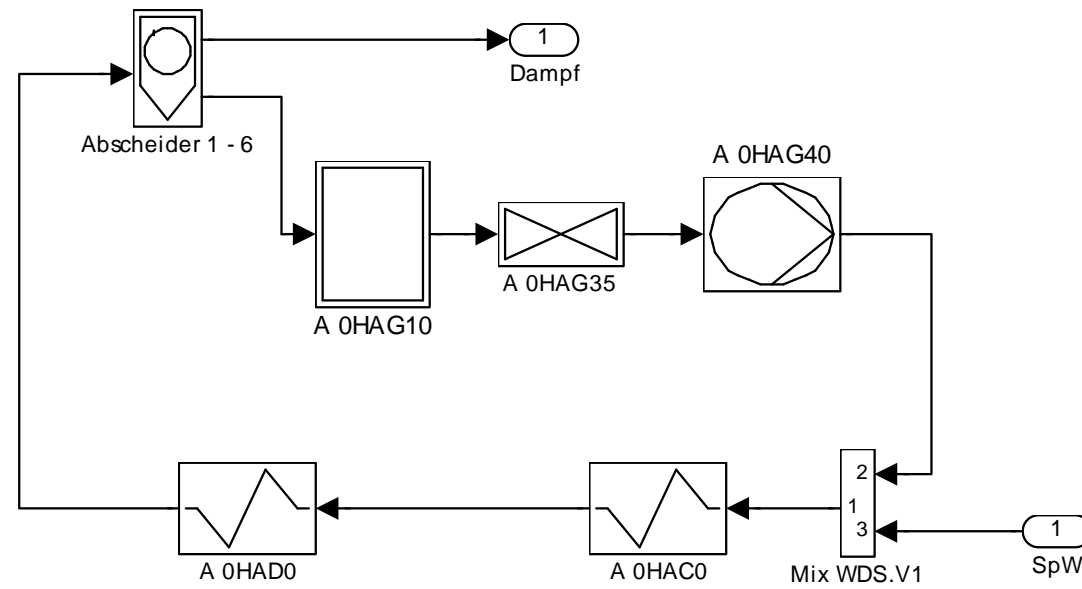


Abbildung 51: Verdampfer-System

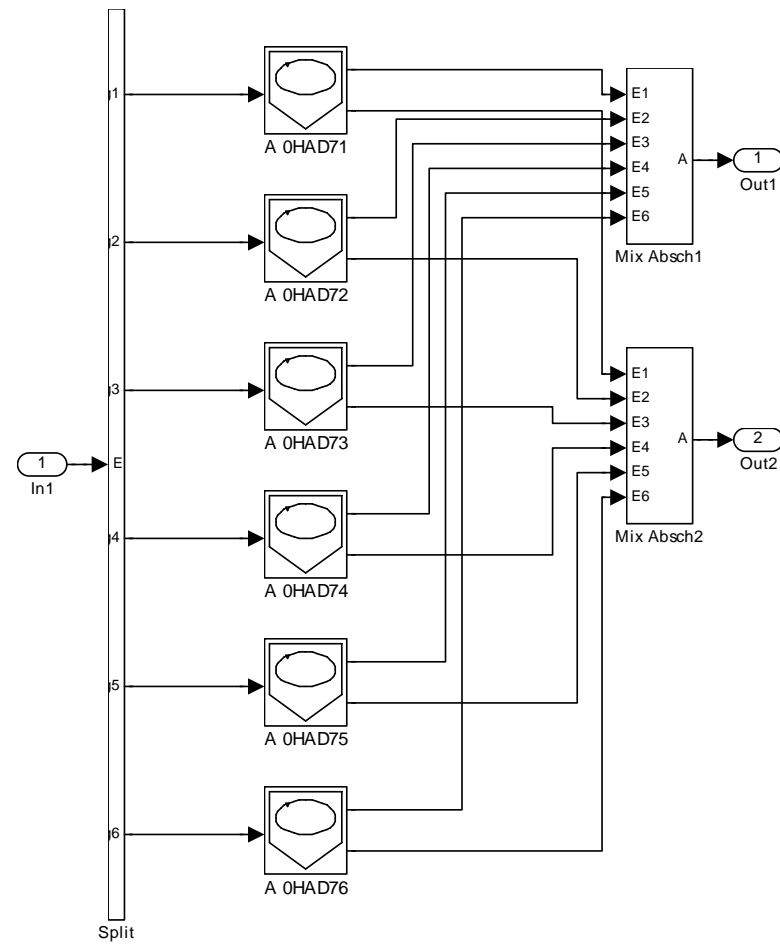
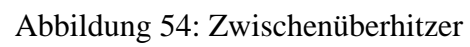


Abbildung 52: Wasser-Abscheider



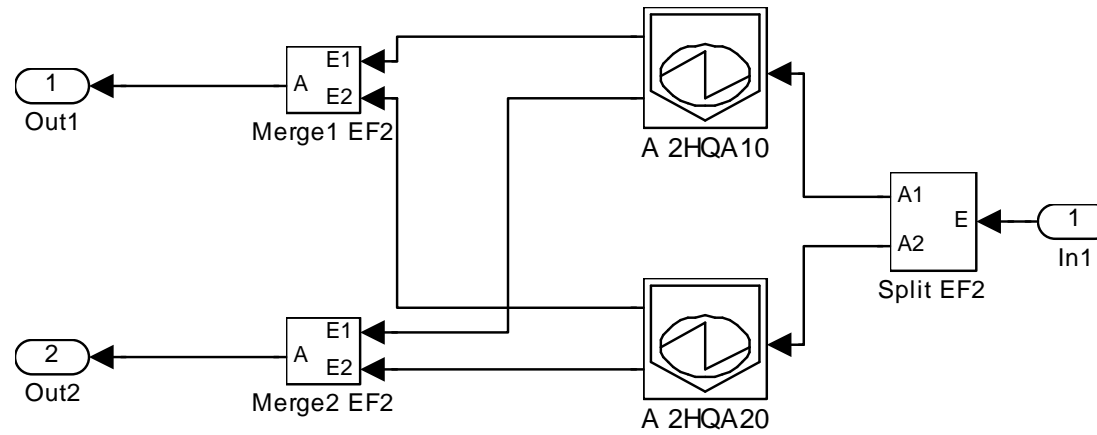


Abbildung 56: Elektro-Filter

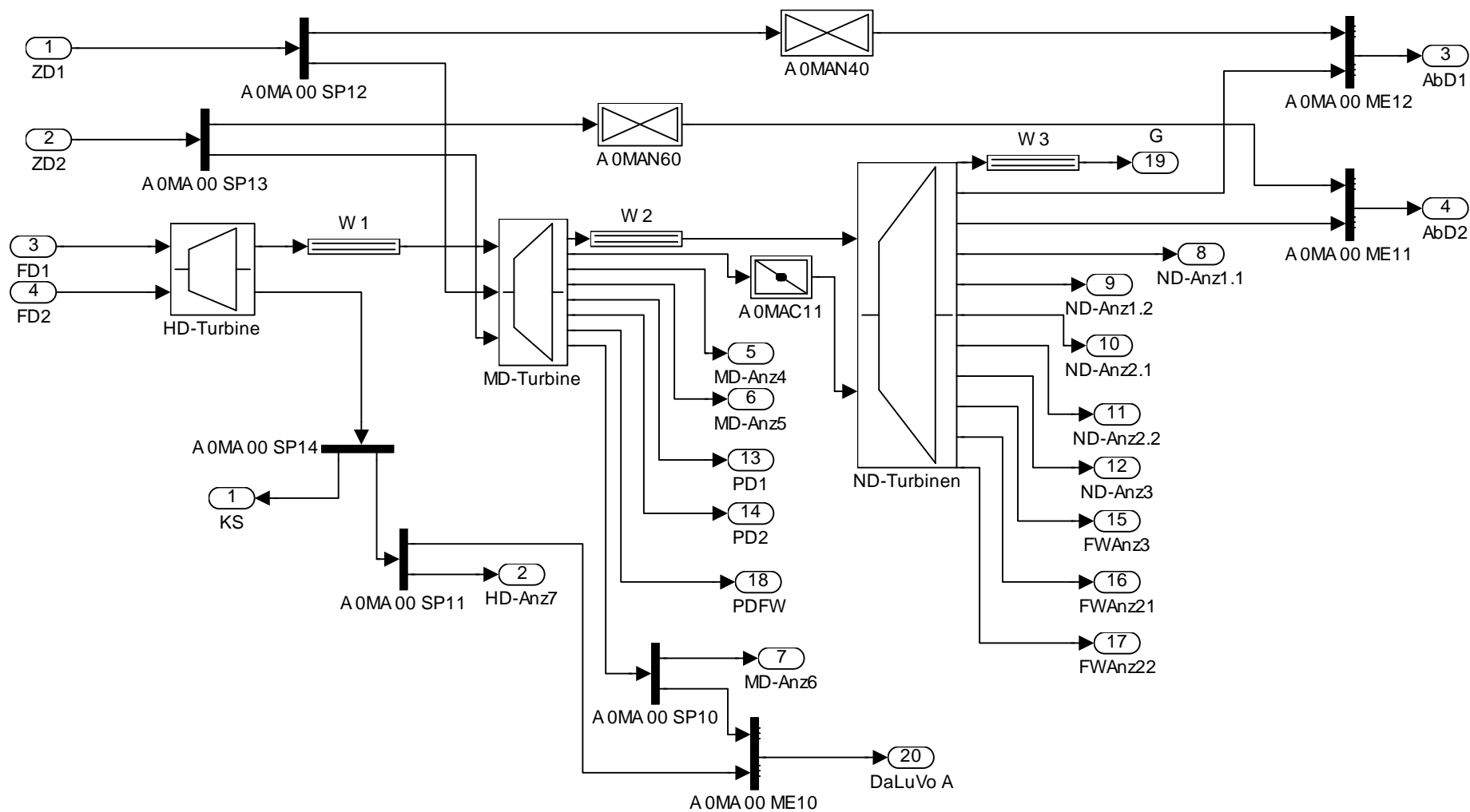


Abbildung 57: Turbinen

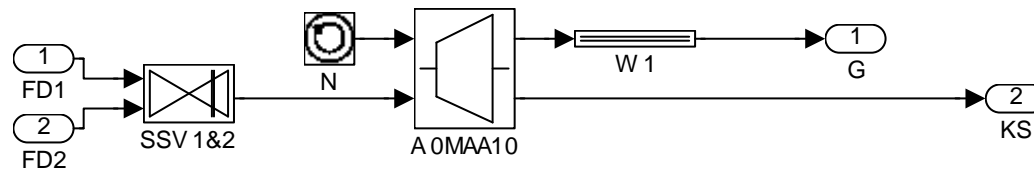


Abbildung 58: Hochdruck-Turbine

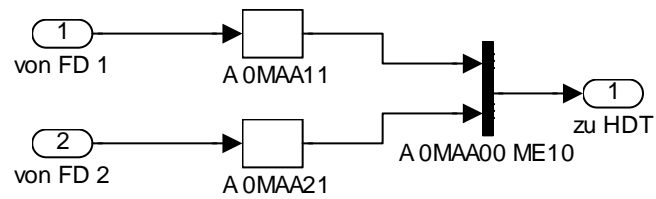


Abbildung 59: Schnellschlussventil der Hochdruck-Turbine

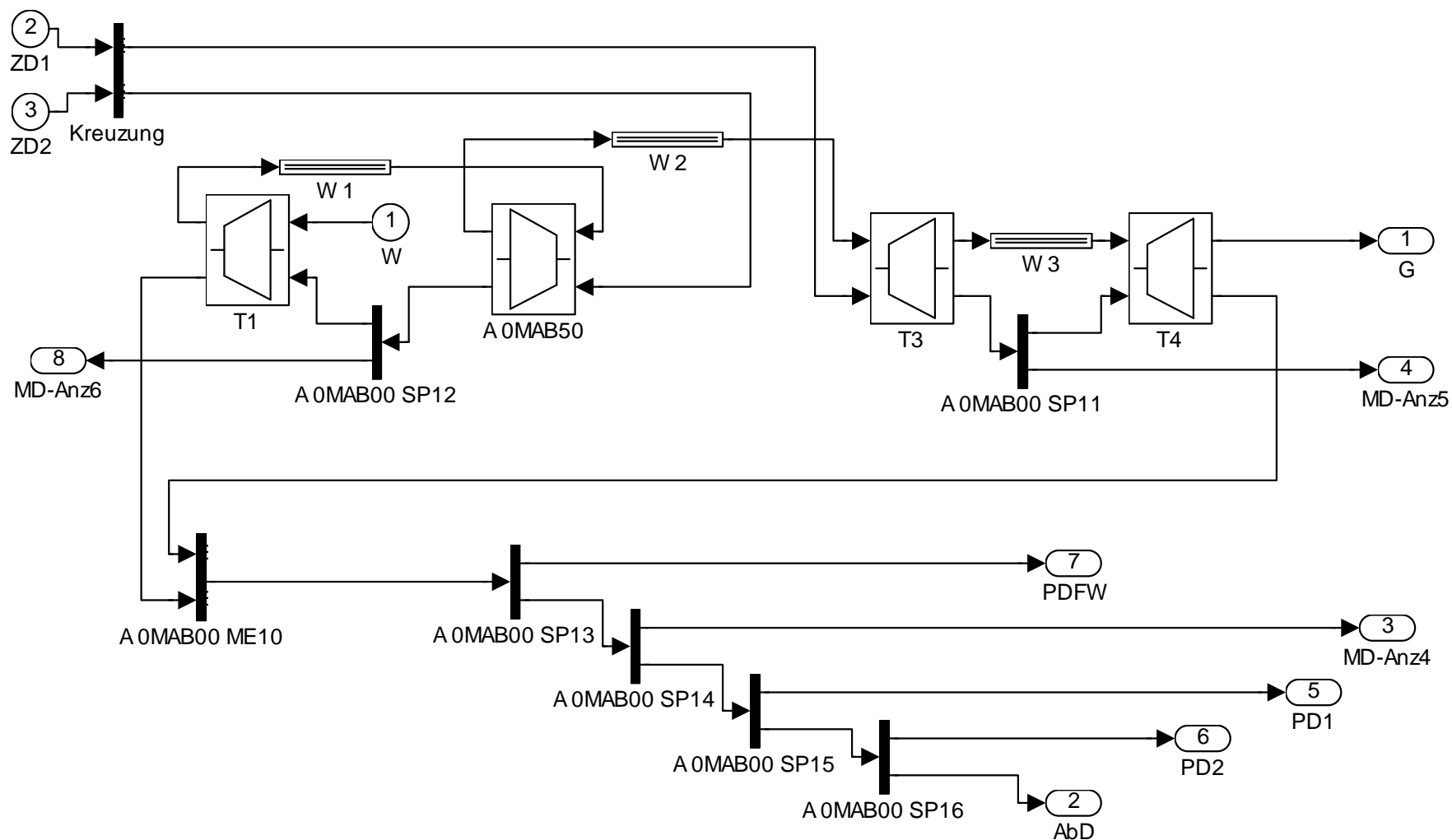


Abbildung 60: Mitteldruck-Turbine

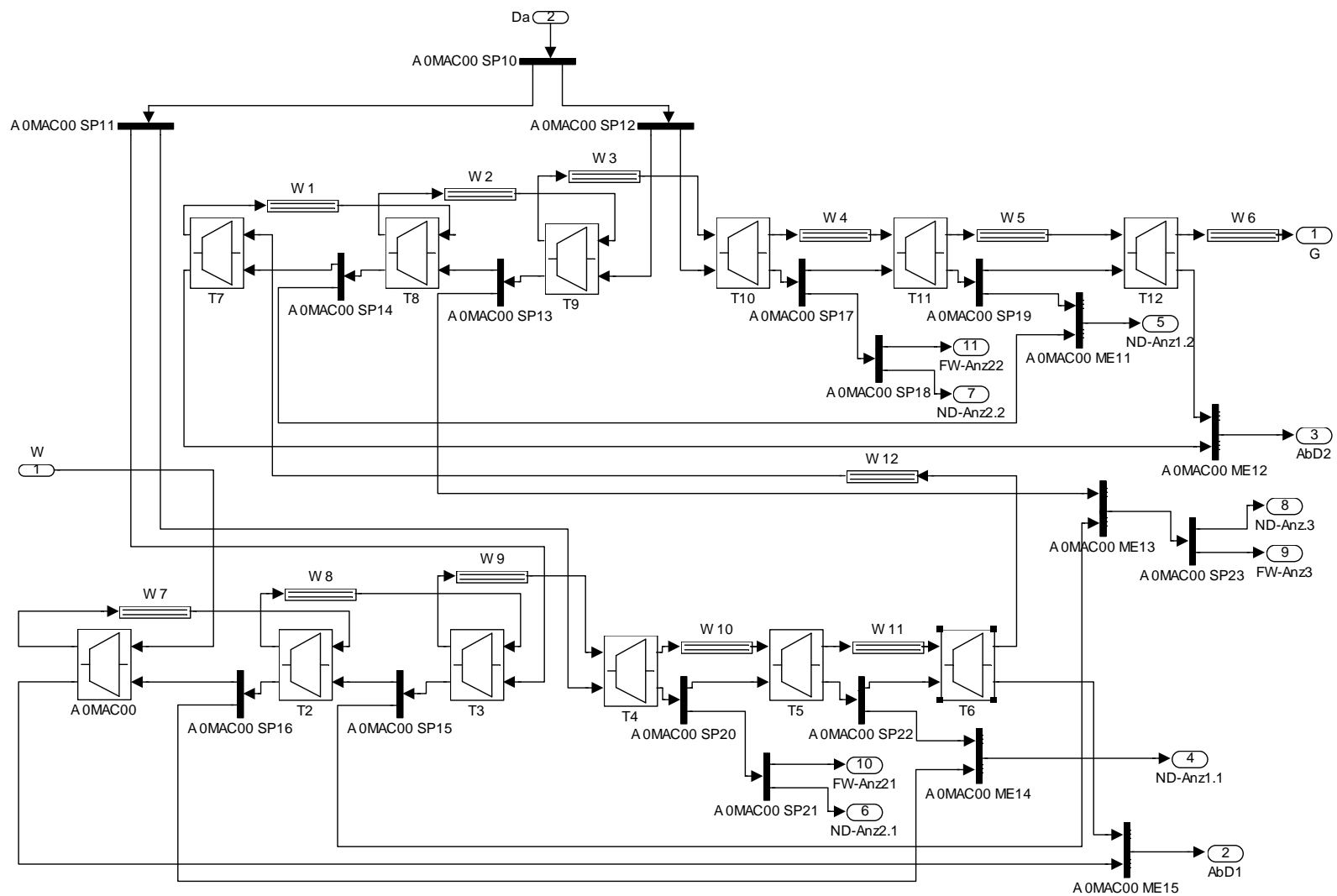


Abbildung 61: Niederdruck-Turbinen

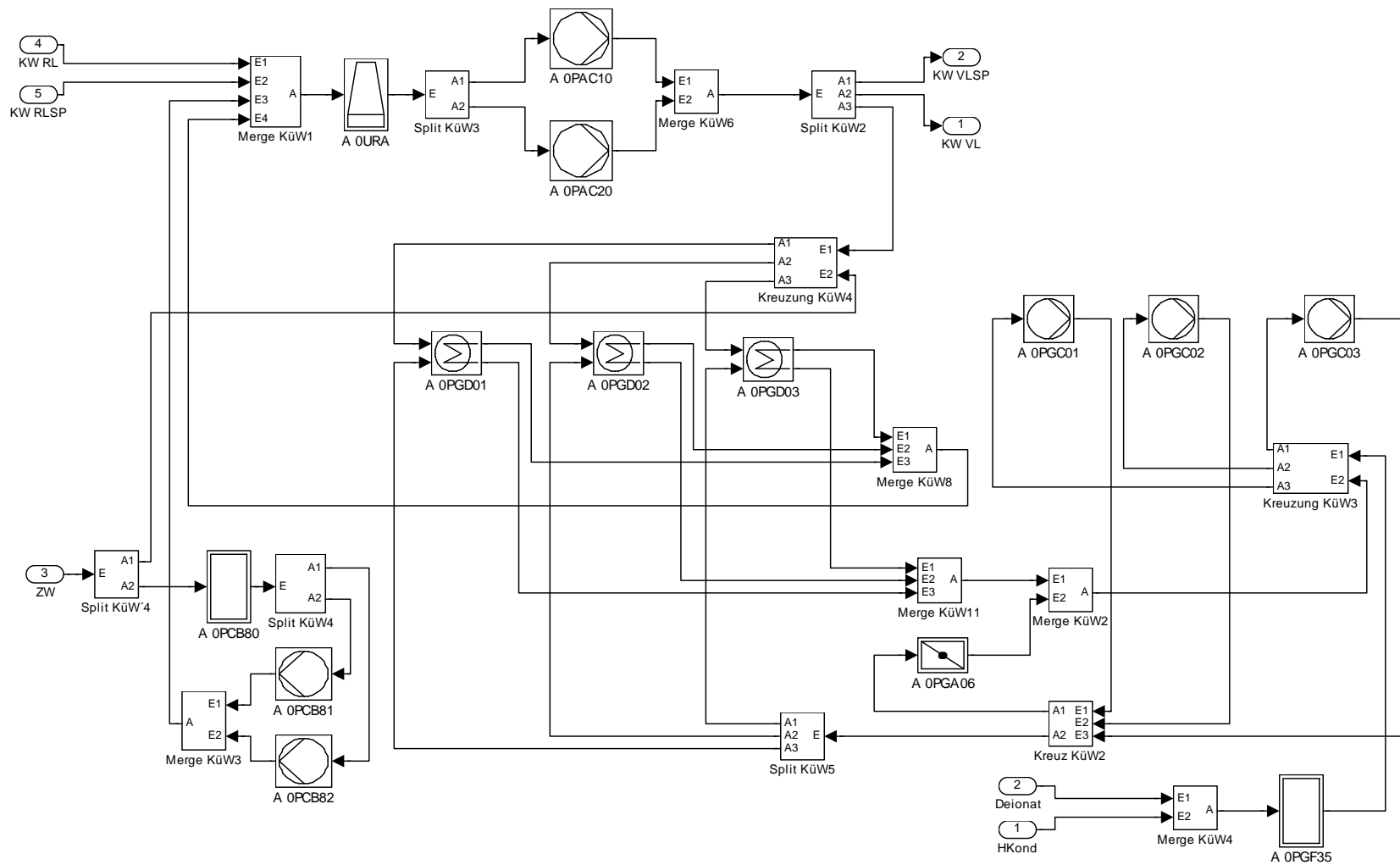


Abbildung 62: Kühlwasserkreislauf

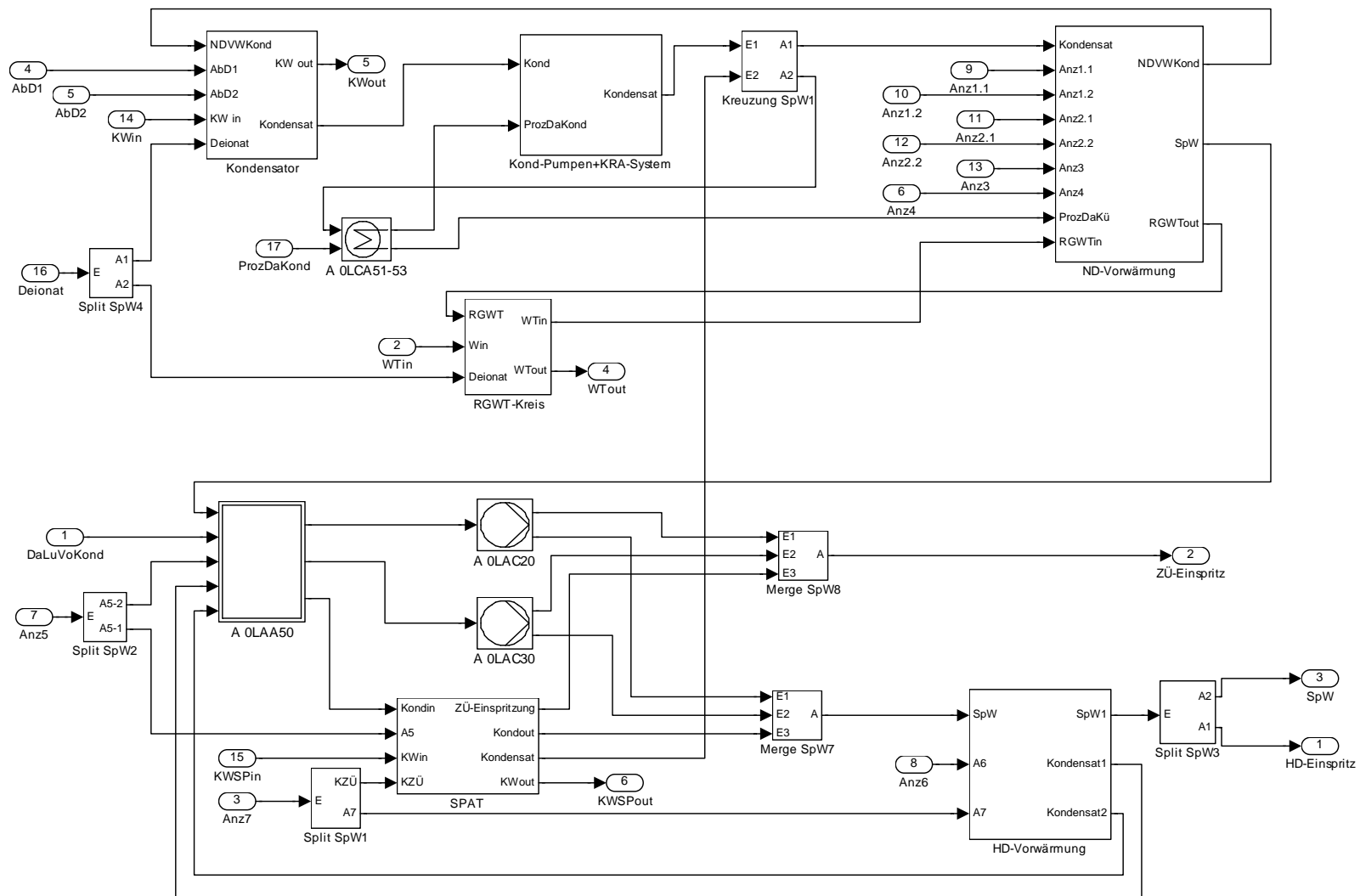


Abbildung 63: Speisewassersystem

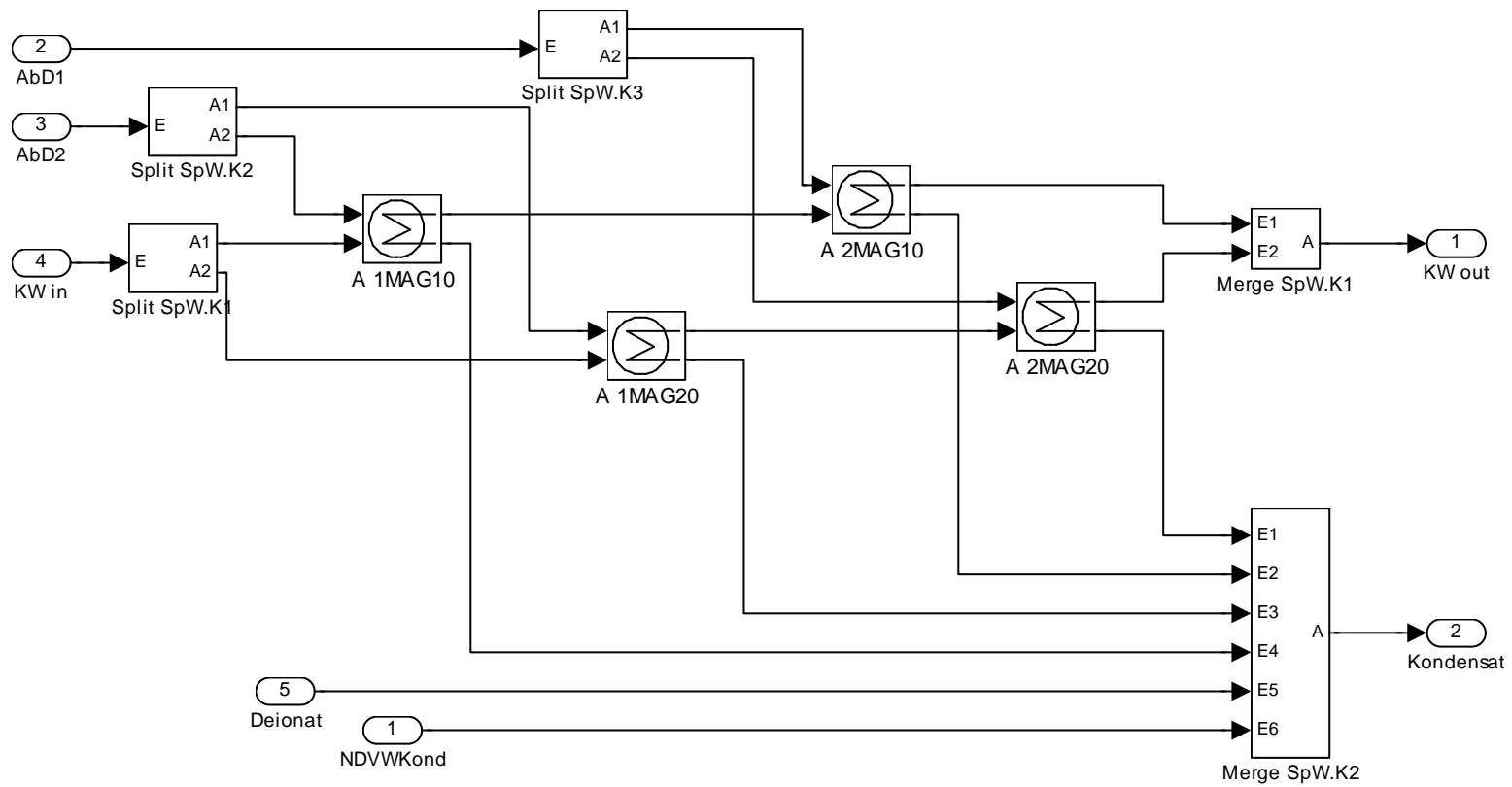


Abbildung 64: Kondensatoren

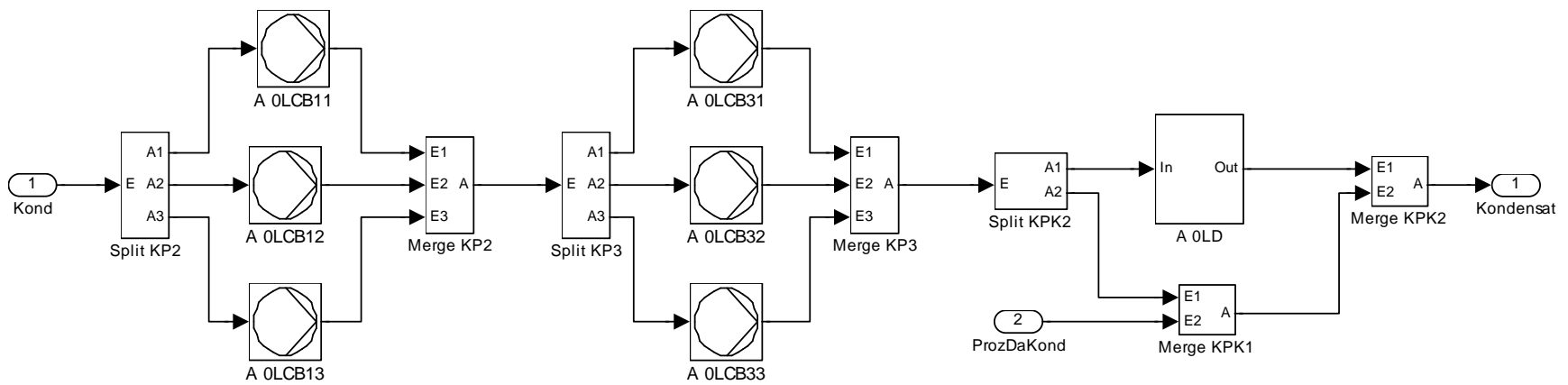


Abbildung 65: Kondensatpumpen und -reinigungssystem

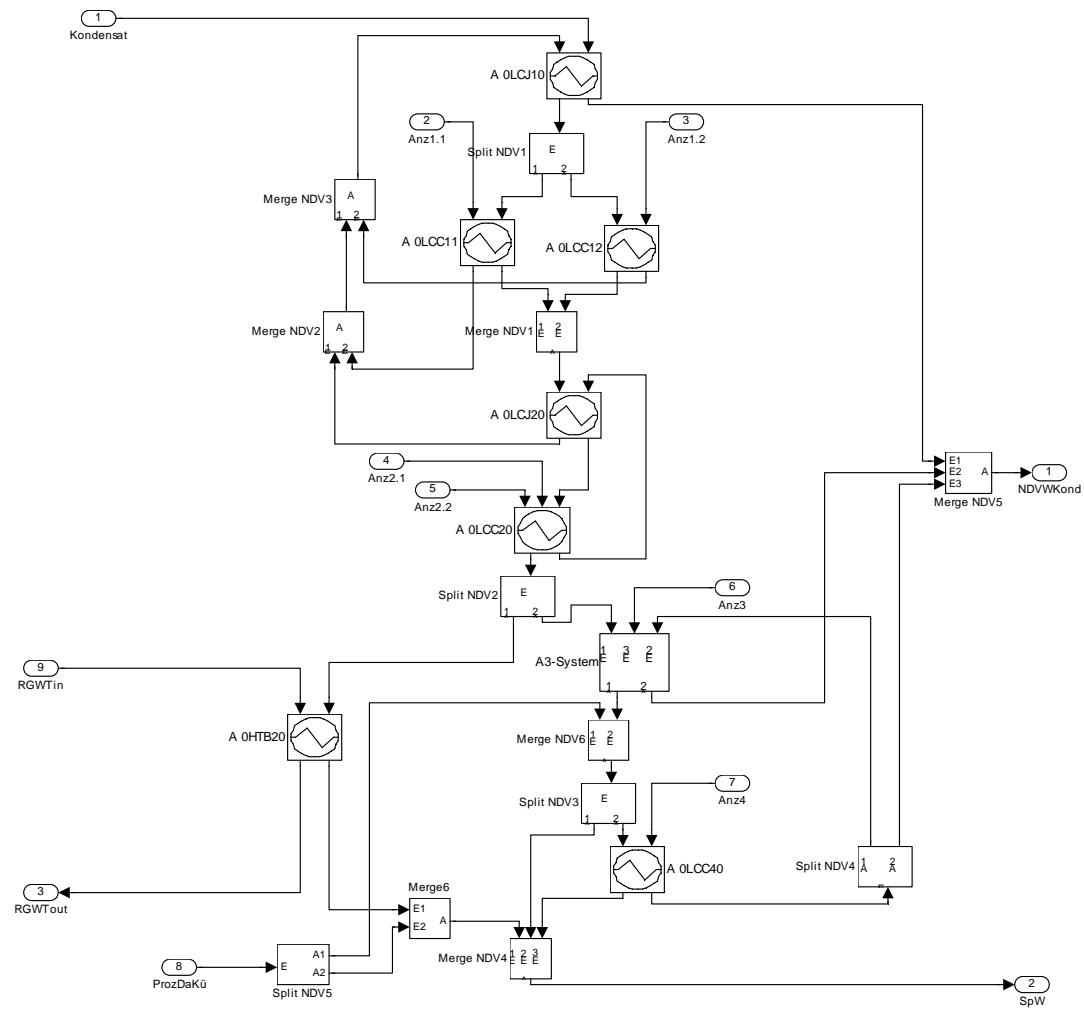


Abbildung 66: Niederdruckvorwärmung

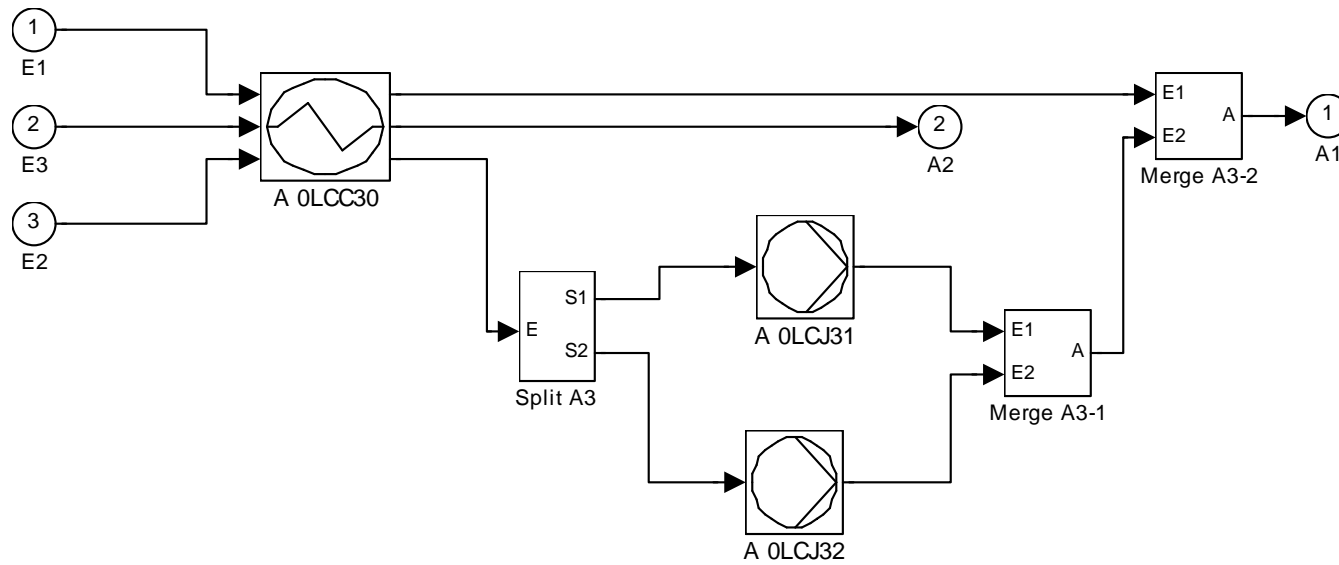


Abbildung 67: NDVW A3

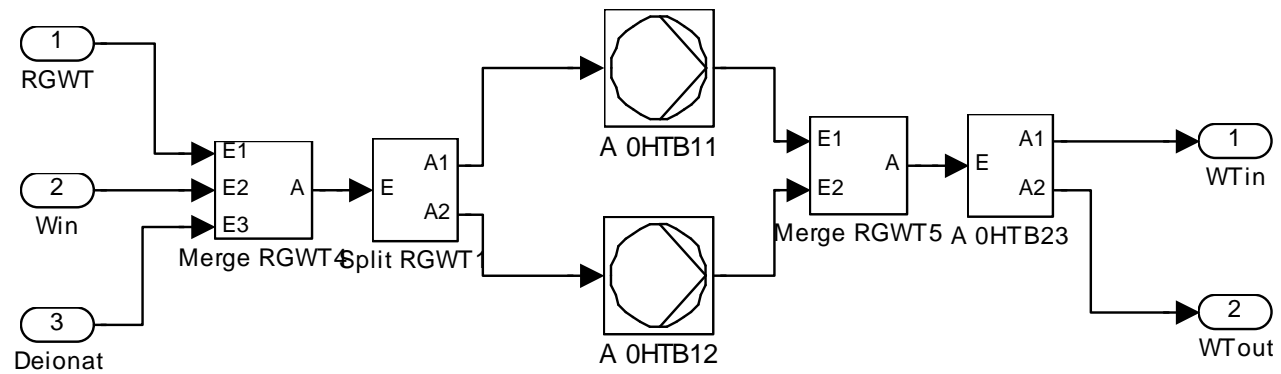


Abbildung 68: RGWT-Umfahrung

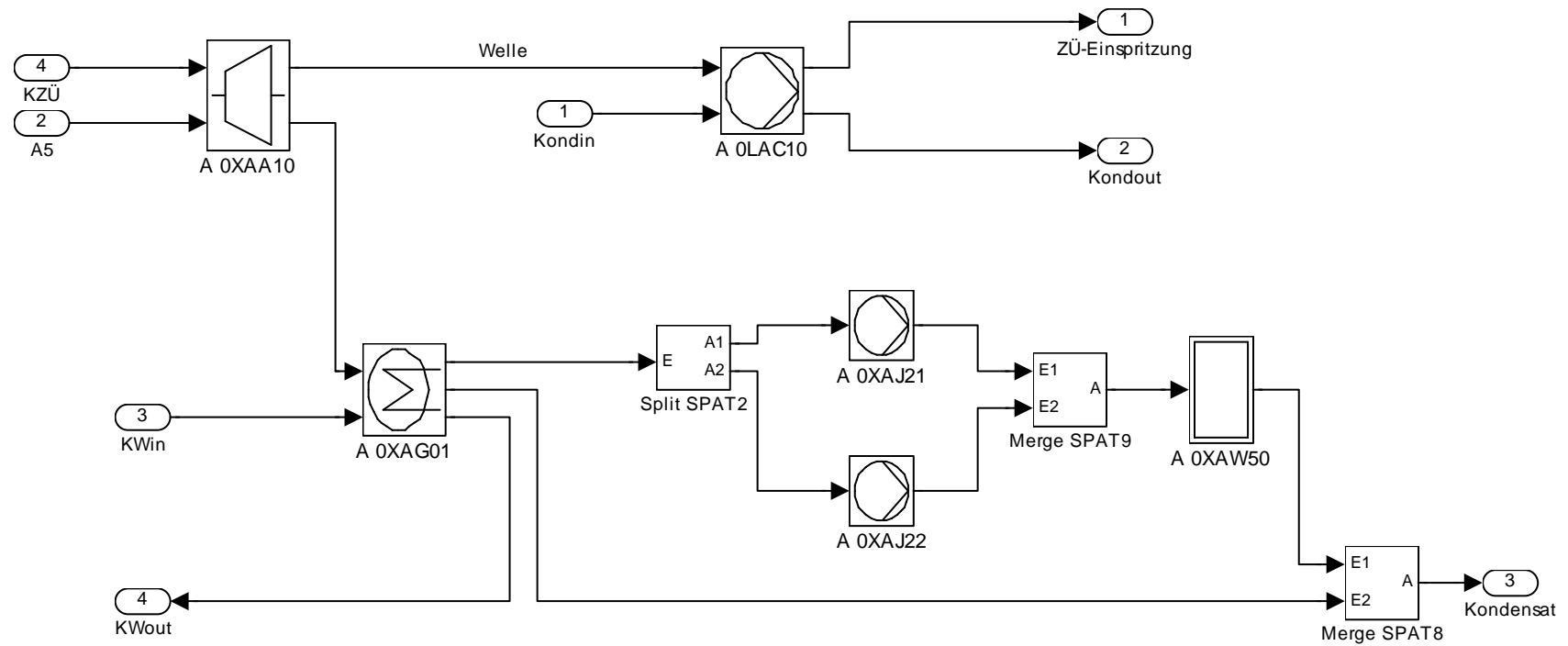


Abbildung 69: SPAT

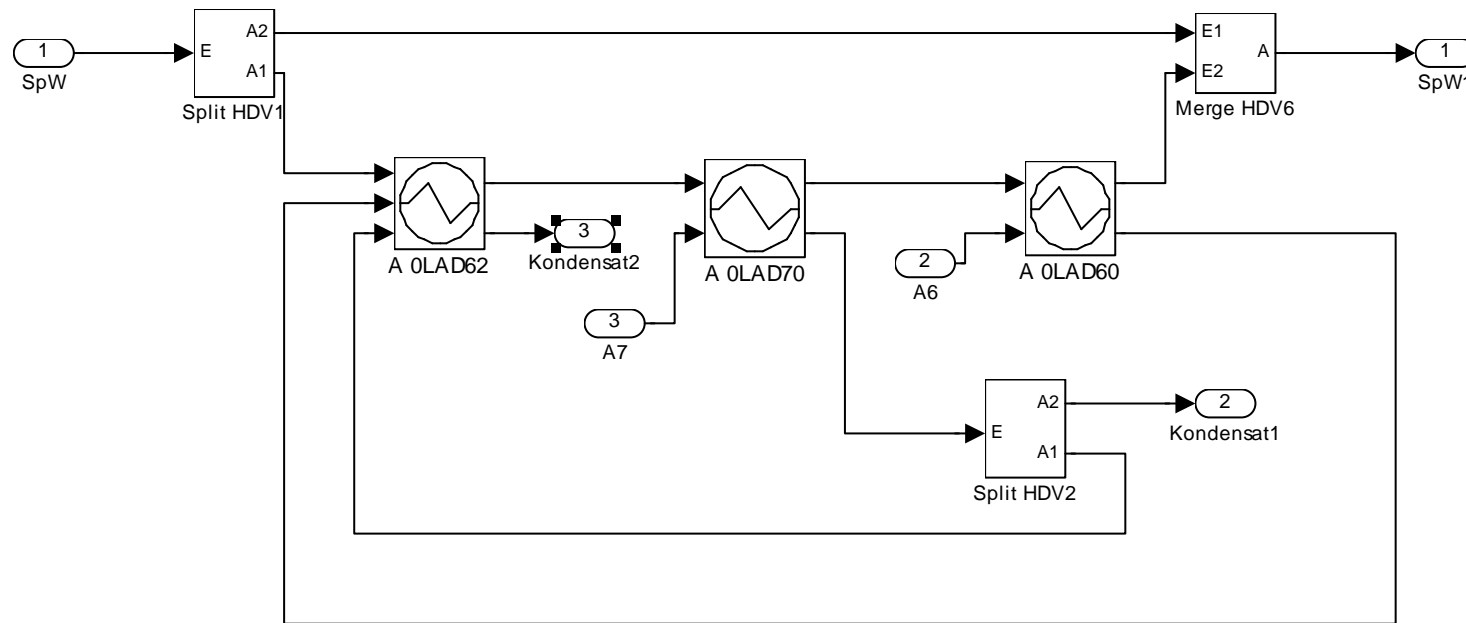


Abbildung 70: Hochdruckvorwärmung

